

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS; CON MATERIALES REUTILIZABLES EN LA CONSTRUCCIÓN
COMO ESCORIA DE ACERO.**



ANLLY TATIANA SEGURA ALMANZA

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
NOVIEMBRE 2016**

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS; CON MATERIALES REUTILIZABLES EN LA CONSTRUCCIÓN
COMO ESCORIA DE ACERO.**



**ANLLY TATIANA SEGURA ALMANZA
COD: 502762**

**Trabajo presentado como requisito para optar
el título de Ingeniero Civil**

Director:

Luis Ángel Moreno Anselmi

Ing. Civil

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ
NOVIEMBRE 2016**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN

JURADO1

JURADO 2

REVISOR METODOLOGICO

Bogotá, noviembre 2016

INTRODUCCION	15
1. GENERALIDADES	17
1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
1.4 OBJETIVOS	18
1.5 ALCANCES	19
2. MARCO TEORICO	20
2.1 ASFALTOS	20
2.1. FUNCIONES DEL ASFALTO	20
2.2. COMPOSICION QUIMICA DE LOS ASFALTOS.....	21
2.2.1. Asfaltos Derivados de Petróleo	22
2.2.2. Asfaltenos.....	23
2.2.4. Aromáticos	25
2.2.5. Saturados	25
2.3. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS	26
2.3.1. Asfaltos para pavimentación:	27
2.3.2. Asfaltos Industriales:	29
2.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS.....	30
2.4.1. Ensayos efectuados a los cementos asfálticos:	30
2.5. CONTENIDO DEL ASFALTO:.....	33
3. ESCORIA DE ACERO.....	34
3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ESCORIA DE ACERÍA.....	36
3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	37
3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ESCORIA EN PROYECTOS VIALES	38
3.3.1 Desventajas	38
3.3.2 Ventajas	38

4. MATERIAL GRANULAR	40
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	40
4.1.1 Agregado grueso	40
4.1.2 Agregado fino.....	41
4.1.3. Llenante Mineral	41
4.1.4. Ensayos realizados a los agregados pétreos según las normas INVIAS 2013	42
5. MEZCLAS ASFÁLTICAS	43
5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	44
5.2 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC)	45
5.2.1 Calidad de Mezcla Densa en Caliente (MDC)	50
5.2.1.1 Resistencia.....	50
5.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO	51
5.3.1. Tensión superficial	51
5.3.2. Angulo de contacto	51
5.3.3. Viscosidad.....	52
5.4. MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL	52
5.3.2. Antecedentes	52
5.3.2. Propósito.....	53
5.3.3 Norma INVIAS E-748-13.....	53
5.4.1. Determinación de la estabilidad y el flujo	56
6 FASE EXPERIMENTAL	58
6.1. PROCEDIMIENTO.....	59
6.1.1 ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) CONCRETO ASFALTICO	59
6.2 PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS A LAS BRIQUETAS	61
➤ Determinación del peso específico bulk.	61
➤ Ensayo de estabilidad y flujo.	61

➤	Análisis de densidad y vacíos.	62
7	ANALISIS DE RESULTADOS.....	66
8	CONCLUSIONES	82
9	RECOMENDACIONES.....	83
10	BIBLIOGRAFIA	84

TABLAS

Tabla 1. Rangos de penetración estándar	29
Tabla 2. Especificaciones para cementos asfálticos.....	32
Tabla 3. Propiedades físicas de la escoria de Acero	36
Tabla 4. Propiedades mecánicas típicas de la escoria de Acero	37
Tabla 5. Requisitos de los agregados pétreos para un nivel de tránsito NT2	43
Tabla 6. Granulometrías típicas para mezclas densas en caliente	47
Tabla 7. Criterios de selección del cemento asfáltico	48
Tabla 8. Diseño de mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.....	49
Tabla 9. Ensayo Marshall gruesos para probeta de 21-30	62
Tabla 10. Ensayo Marshall para gruesos probeta de 31-40	63
Tabla 11. Ensayo Marshall para gruesos probeta de 41-50	63
Tabla 12. Ensayo Marshall para finos probeta de 51-60.....	64
Tabla 13. Ensayo Marshall para finos probeta de 61-70.....	65
Tabla 14. Ensayo Marshall para finos probeta de 70-75.....	65
Tabla 10. Estabilidad y flujo para Gruesos 0%.	66
Tabla 11. Estabilidad y flujo para Gruesos 12,5%	67
Tabla 12. Estabilidad y flujo para Gruesos 24%	68
Tabla 13. Estabilidad y flujo para Gruesos 31%	68
Tabla 14. Estabilidad y flujo para Gruesos 49%	70
Tabla 15. Estabilidad y flujo para Gruesos 63%	71
Tabla 16. Resumen Estabilidad y flujo para Gruesos.	71
Tabla 12. Relación de vacíos; porcentaje de escoria contra vacíos, gruesos.....	73
Tabla 13. Estabilidad y Flujo para finos. 0% Escoria	74
Tabla 14. Estabilidad y Flujo para finos. 6% Escoria	75
Tabla 19. Resumen Estabilidad y flujo para finos.	79
Tabla 20. Relación de vacíos; porcentaje de escoria contra vacíos, finos.....	81

FIGURAS

Figura 1. Asfaltos	22
Figura 2. Asfáltenos	23
Figura. 3. Resinas.....	24
Figura 4. Aromáticos.....	25
Figura 5. Saturados	26
Figura 6. Clasificación de los asfaltos.....	27
Figura 7. Escoria de acero.....	34
Figura 8. Granulometría del material	59
Figura 9. Clasificación material Granular	60
Figura 10. Clasificación material Granular	60
Figura 11. Briquetas clasificadas	61
Figura 12. Briquetas al baño de maría.....	62

GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultados obtenidos con Briqueta a un 0% Escoria	67
Gráfica 2. Resultados obtenidos con Briqueta a un 12.5% Escoria	68
Gráfica 3. Resultados obtenidos con Briqueta a un 24% Escoria	68
Gráfica 4. Resultados obtenidos con Briqueta a un 31% Escoria	69
Gráfica 5. Resultados obtenidos con Briqueta a un 49% Escoria	70
Gráfica 6. Resultados obtenidos con Briqueta a un 63% Escoria	71
Gráfico 7: Estabilidad contra % de Escoria, gruesos.	72
Gráfico 8: Flujo contra % de Escoria, gruesos.	72
Gráfico 9: Estabilidad/Flujo contra % de Escoria, gruesos.	73
Gráfico 10: % Escoria contra Vacíos, gruesos.	74
Gráfica 11. Resultados obtenidos con Briqueta a un 0% Escoria	75
Gráfica 12. Resultados obtenidos con Briqueta a un 6% Escoria	76
Gráfica 13. Resultados obtenidos con Briqueta a un 12.5% Escoria	76
Gráfica 14. Resultados obtenidos con Briqueta a un 19.5% Escoria	77
Gráfica 15. Resultados obtenidos con Briqueta a un 37% Escoria	78
Gráfica 16. Resultados obtenidos con Briqueta a un 51% Escoria	78
Gráfico 17: Estabilidad % de Escoria, finos.	79
Gráfico 18: Flujo contra % de Escoria, finos.	80
Gráfico 18: Estabilidad/Flujo contra % de Escoria, finos.	80
Gráfico 19: % Escoria contra Vacíos, finos.	81

GLOSARIO

Agregado: Material granular duro, de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferentes tamaños.¹

Agregado fino: Agregado que pasa el tamiz de 4.75 mm (# 4).

Agregado grueso: Agregado retenido en el tamiz de 4.75 mm (# 4).

Ahuellamiento: Surcos que se desarrollan en el pavimento, en los carriles de las ruedas. Pueden ser resultado de una consolidación por movimiento lateral de una o más capas del pavimento bajo efectos del tráfico o, pueden ser generados por un desplazamiento de la superficie misma del pavimento. Ocurren como resultado del movimiento plástico de una mezcla que tiene muy poca estabilidad para resistir el tráfico.²

Asfalto: Es un material altamente impermeable, adherente y cohesivo, capaz de resistir altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes, se usa como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de carreteras o autopistas. Está presente en el petróleo crudo y compuesto casi por completo de bitumen.³

Bitumen: Sustancia cementante de color negro (sólida, semisólida o viscosa), natural o fabricada, compuesta principalmente de hidrocarburos de alto peso molecular, siendo típicos los asfaltos, las breas o alquitranes, los betunes y las asfálticas.⁴

Cemento asfáltico: Material cementante, de color entre carmelito oscuro y negro, en el cual los constituyentes predominantes son bitúmenes que aparecen en la

¹ Definición ABC. Definición de edificación. [En línea]. 2007-2016. Disponible en web: <<http://www.definicionabc.com/tecnologia/edificacion.php>>

² Definición de construcción. [En línea]. 11 de junio de 2015. Disponible en web: <<http://conceptodefinicion.de/construccion/>>

³ Definición de asfalto. [En línea] 11 de enero de 2015. Disponible en web <<http://es.slideshare.net/robertochamorro334/documento-asfalt>>

⁴ Definiciones web. Definición de Bitumen. [En Línea]. 24 septiembre 2016. Disponible en web: <<https://www.google.com.co/bitumen/>>

naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo. El asfalto es un constituyente, en proporciones variables, de la mayoría de petróleos crudos.

Compactación: Acto de comprimir un volumen dado de material en un volumen más pequeño. Generalmente la compactación se logra usando los rodillos o compactadores neumáticos.

Deformación: Cualquier cambio que presente un pavimento respecto a su forma original. **Densidad:** Grado de solidez que puede alcanzarse en una mezcla dada. Está limitada por la eliminación total de los vacíos que se encuentran entre las partículas de la mezcla.⁵

Desintegración: Separación progresiva de las partículas del agregado en el pavimento desde la superficie hacia abajo, o desde los bordes hacia el interior. Puede ser causada por falta de compactación, construcción de una capa de rodadura muy delgada en períodos fríos, agregado sucio o desintegrable, muy poco asfalto en la mezcla o sobrecalentamiento de la mezcla asfáltica.

Estabilidad: Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo las cargas impuestas. La estabilidad está en función de la cohesión y la fricción interna del material.

Flexibilidad: Capacidad del pavimento asfáltico de ajustarse a los asentamientos en la fundación.

Grietas: Fracturas en la superficie del pavimento asfáltico.

Impermeabilidad: Capacidad de un pavimento asfáltico de resistir el paso de aire y agua dentro o a través del mismo.

Mezcla asfáltica: Una mezcla asfáltica en general es una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos en proporciones exactas. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como capa terminada para un determinado uso.⁶

Ondulaciones: Deformación en el pavimento, dando origen a un movimiento plástico caracterizado por ondas en la superficie del pavimento.

⁵Definición de deformación [En Línea]. Enero 2014. Disponible en web <http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%202.pdf>

⁶Definición Mezcla asfáltica. [En Línea]. 20 octubre 2016. Disponible en Web <<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf>>

Resistencia a Capacidad de un pavimento asfáltico: para resistir flexión la fatiga repetida causada por cargas móviles. Entre más alto contenido de asfalto, mayor será la resistencia a la fatiga. ⁷

Resistencia al Propiedad de la superficie asfáltica: de resistir el deslizamiento, particularmente cuando está mojado. ⁸

Trabajabilidad: Facilidad con que las mezclas de pavimentación pueden ser colocadas y compactadas.

Vacíos: Espacios de aire en una mezcla compactada rodeados de partículas cubiertas de asfalto.⁹

⁷Definición. Capacidad del asfalto. [En Línea]. Enero 2014. Disponible en web <http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%202.pdf>

⁸Definición Resistencia del asfalto. [En línea]. Septiembre 2015. Disponibles en web <http://www.construmatica.com/construpedia/Clasificaci%C3%B3n_de_las_Mezclas_Asf%C3%A1lticas>

⁹Definición de vacíos. [En Línea]. Abril 2015. Disponible en web <http://www.academia.edu/13030649/8.1._M%C3%A9todo_Marshall_para_el_dise%C3%B1o_de_mezclas_asf%C3%A1lticas_en_caliente>

RESUMEN

Este proyecto se planteó con el fin de estudiar el comportamiento físico y mecánico del asfalto; con materiales reutilizables en el campo constructivo como la escoria de Acero.

Al realizar diferentes muestras, se obtuvo la muestra 5,5% en porcentaje de asfalto para efectuar los diseños y evaluar el comportamiento de la mezcla asfáltica.

La escoria de horno es un subproducto derivado de la fabricación del arrabio (materia prima para la elaboración del acero), la cual se genera en hornos de siderurgias. Es utilizada como material en la construcción de carreteras y en otras aplicaciones como concreto hidráulico.

Se caracterizó la escoria y el agregado; la mezcla con 100% agregado tradicional se utilizó como parámetro de comparación para conocer las diferencias entre las mezclas con escoria y las que utilizan agregados tradicionales.

Para el diseño de mezclas se utilizó el método Marshall (INV. E-748-13)), la mezcla que presentó mejor comportamiento fue la que combina agregados tradicionales con escoria.

Palabras claves: Mezcla asfáltica, escoria de acero; comportamiento físico, comportamiento mecánico.

INTRODUCCION

Pavimentos flexibles se denominan a aquellas estructuras de pavimento que presentan flexión, un pavimento flexible se adapta a las cargas. Este tipo de pavimentos son de amplio uso en zonas de tráfico¹⁰

La estructura del pavimento flexible está compuesta por varias capas de material. Cada capa recibe las cargas por encima de la capa, por lo tanto, la capa más abajo en la estructura del pavimento, recibe menos carga.

El volumen de tráfico cada vez mayor en las carreteras y la creciente demanda de los pavimentos más fuerte, más duraderos y más seguros han llevado a la búsqueda de nuevos materiales, procedimientos de diseño y soluciones más rentables.

En Colombia, el cambio abrupto del clima es uno de los factores que más incide en el deterioro de la superficie de rodadura del pavimento, debido a cambios bruscos como lo son temperatura, erosión, lluvias, escorrentías, etc. Además, también influye en el deterioro de la carpeta asfáltica la demanda del tráfico en las vías, la capacidad portante del suelo base o subrasante, entre otros. Es por esto que luego de que el pavimento está expuesto a condiciones extremas de diseño, se presentan fallas no estructurales y estructurales, que terminan por hacer fallar el pavimento antes del periodo para el cual se diseñó.¹¹

Una de las alternativas para mejorar el comportamiento físico mecánico de las mezclas asfálticas es realizar modificaciones con materiales que tengan alta resistencia.

En el presente trabajo se realizó el estudio del comportamiento físico mecánico de una mezcla asfáltica con material resistente al tráfico, como la escoria del acero que se obtiene como residuo de las plantas de Acero; Se optó por realizar el estudio de esta mezcla con el fin de mejorar la resistencia del pavimento a las cargas que es sometido.

¹⁰ Pavimentos flexibles. [En Línea] abril 2014. Disponible en web < <http://canalconstruccion.com/pavimentos-flexibles.html> >

¹¹ MONTEJO FONSECA Alfonso; Ingeniería de pavimentos; Universidad Católica de Colombia, 2002.

El proyecto se divide en 9 capítulos, en el capítulo 1 se presenta las generalidades del proyecto, en el capítulo 2 el marco teórico correspondiente al asfalto, funciones, composición, clasificación y caracterización.

En el capítulo 3 hace referencia a la escoria de acero composición química, ventajas y desventajas en el uso de la construcción, en el capítulo 4 se encuentra la caracterización de material granular.

En el capítulo 5 se analiza las a mezclas asfálticas y el procedimiento para la realización del ensayo Marshall.

La fase experimental se encuentra en el capítulo 6, donde se explica de forma detallada el procedimiento que se siguió para la elaboración de las probetas y el ensayo Marshall.

En los capítulos 7, se analiza los porcentajes de asfalto modificado con unas de las adiciones y la prueba de penetración realizada.

Las conclusiones y recomendaciones se definen en el capítulo 8.

1. GENERALIDADES

1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN

Asfaltos modificados

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿A través de modificaciones en mezclas asfálticas se puede mejorar, el estado de las vías?

La utilización de materiales nuevos como agregado de las mezclas asfálticas; puede ayudar a resolver el constante deterioro actual de las vías en el país. Agregando material a las mezclas asfálticas en caliente se pueden cambiar las propiedades físicas y mecánicas que presentaría esta nueva mezcla, garantizando mayor durabilidad y a alargando su vida útil.

A nivel Nacional, “El Instituto Nacional de Vías, actualiza permanentemente el estado de la Red Vial a su cargo, clasificándola en vías pavimentadas y no pavimentadas y estableciendo las condiciones en las cuales se encuentran”.¹²

1.3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación se enfoca en el empleo de escoria de acero como modificador del ligante y como mejorador de la mezcla asfáltica para su uso en la construcción de pavimentos flexibles y semirrígidos; se realizará un diseño como propuesta de modificador de mezclas asfálticas.

Los materiales de asfaltos modificados son el producto de la disolución o en la incorporación de materiales nuevos en la mezcla, son sustancias estables, en el tiempo y cambio de temperatura; que se le añaden al material para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, mejorando su reacción frente a cambios bruscos de cargas y temperaturas.

A pesar de ser la escoria un residuo de la producción de acero esta puede ser utilizada en la agricultura para tratamiento de suelos sulfato-ácidos.

En la construcción tiene disímiles usos en explanadas, bases y sub-bases de carreteras, en capa de rodadura de pavimentos y como aditivo al clinker en las plantas productoras de cemento, entre otras.

¹² INSTITUTO NACIONAL DE INVIAS. Invias.2013.

Por esta razón existen varios trabajos a nivel internacional que tratan el tema del uso de las escorias de acería en la construcción.

Sobre la base de estos resultados se concluye que estas escorias no presentan ninguna reacción perjudicial en todos los análisis y ensayos efectuados, pudiendo utilizarlas como:

- -Áridos en bases y sub-bases,
- -Áridos en mezclas asfálticas,
- -Adición en mezclas con cemento Portland para la fabricación de hormigón.

La estabilidad que presentaron las mezclas con escoria fue más alta que en las mezclas con agregado tradicional, contribuyendo a la durabilidad del pavimento, volviéndolo más resistente a la deformación causada por el tráfico.

- Al combinar la escoria con agregados tradicionales se consigue compensar el bajo porcentaje de finos en la misma y disminuir así el porcentaje de asfalto en la mezcla.

Se evaluará la eficiencia de este material en la realización de la mezcla asfáltica; El deterioro del pavimento está altamente influenciado por condiciones climáticas severas, alto volumen de tráfico y cargas excesivas en los camiones, así como también por la calidad de su construcción y su mantenimiento; el deterioro de los pavimentos se acelerará después de varios años de servicio pero una rehabilitación a tiempo con tratamientos como la adición de una nueva capa de rodadura, el reciclaje o la recuperación de los asfaltos envejecidos pueden devolver la calidad del pavimento y extender la vida útil de la carretera.

Es por ello que se hace importante determinar si la escoria de acero es un material eficiente para realizar estas mezclas garantizando mejor fricción entre suelo y llanta, y mayor duración de la capa,

El área de influencia del proyecto se puede aplicar a nivel nacional debido a que la investigación se puede aplicar para el mejoramiento continuo de la calidad y conciencia ambiental en todo el país.

1.4OBJETIVOS

1.4.1 General

Evaluar ventajas y desventajas del uso de escoria de acero como agregado en mezclas asfálticas, de acuerdo a procedimientos y especificaciones normalizadas.

1.4.2 Específicos

- Caracterizar la escoria como agregado para mezclas asfálticas.
- Evaluar el comportamiento de las combinaciones de agregados en las mezclas.
- Realizar los algunos de los ensayos de laboratorio como lo son: Ensayo Marshall, Ensayo de Punto de Ablandamiento, Ensayo de Penetración, y con esto poder determinar las ventajas y desventajas que se presentan en el asfalto modificado en comparación con el asfalto convencional.
-

1.5 ALCANCES

- Uno de los alcances del proyecto de investigación, es conocer el comportamiento de la mezcla asfáltica modificada y determinar por medio de ensayos de laboratorio su comportamiento, basándose en: bibliografía específica (ensayo Marshall), artículos de investigación, investigaciones anteriores, conocimiento de los docentes de área de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia.
- Analizaremos los estudios pertinentes para llevar a cabo el uso de modificaciones asfálticas en Colombia.

2. MARCO TEORICO

2.1 ASFALTOS

Los asfaltos pertenecen al grupo de las sustancias bituminosas, que se encuentran en la naturaleza en estado sólido, líquido o gaseoso, además es un componente del petróleo en los que se encuentra en solución, que mediante un proceso de refinación las secciones volátiles se aíslan dando como resultado un tipo de residuo denominado Asfalto.

Los asfaltos de petróleo pueden tener base asfáltica o base nafténica. Los de la base asfáltica son los que poseen mejores características para su empleo en pavimentación por sus propiedades ligantes y de resistencia a la meteorización. Los de bases parafínicas se oxidan paulatinamente al exponerse al aire dejando un producto pulverulento sin poder ligante.¹³

2.1. FUNCIONES DEL ASFALTO

Según la Asopac: (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia), el asfalto cumple las siguientes funciones:

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua proveniente de la precipitación.
- Proporcionar una íntima unión y cohesión entre agregados, capaz de resistir la acción mecánica de disgregación producida por las cargas de los vehículos.
- El asfalto tiene propiedades tales como consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad. Estas propiedades lo hacen ideal para la

¹³ Asfaltos. En Línea abril 2014. Disponible en web < <http://www.wordreference.com/definicion/asfalt/> >

construcción de pavimentos flexibles, como también para bases estabilizadas, emulsiones asfálticas, etc.¹⁴

- “En su mayoría, los asfaltos se comportan como sólidos o semisólidos a una temperatura ambiente y su comportamiento varía dependiendo a la temperatura a la que se lo someta, al aumentarle la temperatura se ablanda y se vuelve fluido, permitiendo así recubrir los agregados durante el proceso de fabricación de una mezcla asfáltica.¹⁵

2.2. COMPOSICION QUIMICA DE LOS ASFALTOS

Cuando el asfalto es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados, estos materiales son llamados asfáltenos, nombre propuesto por Boussingault en 1837. Existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n-pentano.

Las sustancias solubles en n-heptano se denominan en general petroléenos, también llamados máltenos. Las resinas se encuentran en los petroléenos, pueden ser parcialmente precipitadas por algunos solventes o adsorbidas de los petroleros por medio de arcillas u otras minerales activados, estas resinas, previamente adsorbidas, pueden pasar a un proceso de desorción del mineral por solventes previamente seleccionados.

Los carbonos son materiales duros presentes en los asfáltenos de algunos asfaltos. Estos son solubles en desulfuro de carbono pero insolubles en tetracloruro de carbono.

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos. El modelo adoptado para configurar la estructura del asfalto se denomina modelo micela, en el cual existen dos fases; una discontinua (aromática) formada por los asfáltenos y una continua que rodea y solubiliza a los asfáltenos, denominada máltenos. Las resinas contenidas en los máltenos son intermediarias en el asfalto, cumpliendo la misión de homogeneizar y compatibilizar a los insolubles asfáltenos.

¹⁴ *Cartilla de Pavimento asfáltico. Asociación de productores y pavimentadores Asfálticos de Colombia.* 28 octubre de 2015.

¹⁵ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico. Popayán: Litocenco Ltda., 5ª edición., 2006. p.17*

Los máltenos y asfáltenos existen como islas flotando en el tercer componente del asfalto, los aceites.¹⁶

Figura 1. Asfaltos



Imagen tomada de

https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/

2.2.1. Asfaltos Derivados de Petróleo

Los asfaltos más utilizados en el mundo hoy en día, son los derivados de petróleo, los cuales se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. Representan más del 90 % de la producción total de asfaltos. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi en su totalidad.

¹⁶Composición química de los asfaltos. En Línea. 2000-2016. Disponible en web < https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/ [on/www.wordreference.com/definicion/asfalt/](http://www.wordreference.com/definicion/asfalt/) >

Sin embargo, existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto que poseen, los petróleos se clasifican en:

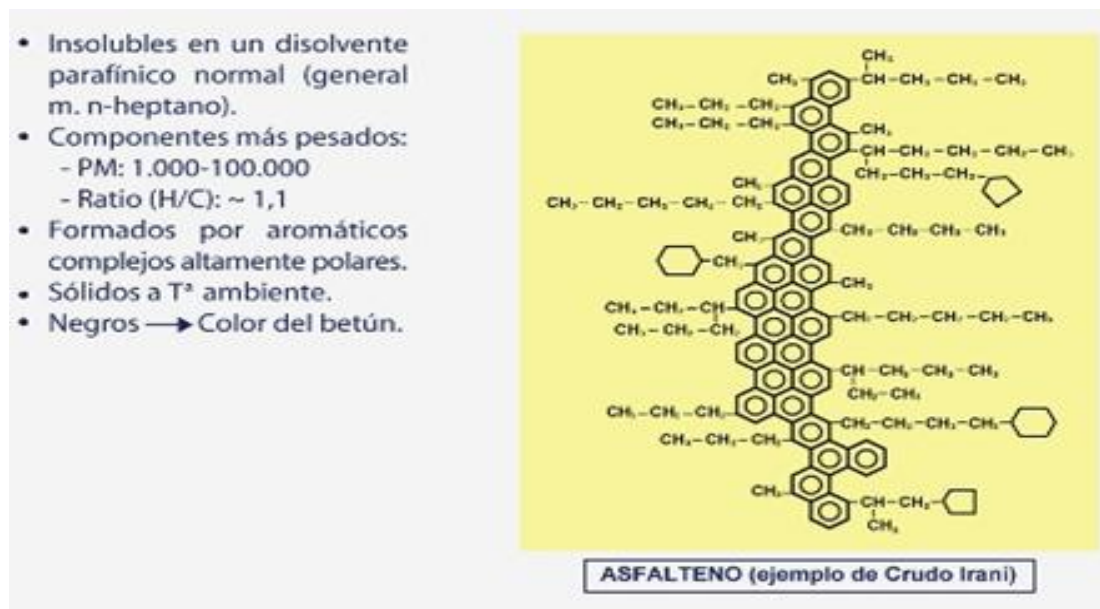
- ✓ Petróleos crudos de base asfáltica.
- ✓ Petróleos crudos de base parafínica

El asfalto está compuesto químicamente por asfáltenos, resinas, aromáticos y saturados¹⁷

2.2.2. Asfaltenos

Son aquellos que suministran la dureza del asfalto y componen su esqueleto. Los asfáltenos proporcionan la resistencia mecánica de los asfaltos y les dan la consistencia.

Figura 2. Asfáltenos



¹⁷ Composición química de los asfaltos. En Línea. 2000-2016. Disponible en web < https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/ www.wordreference.com/definicion/asfalt/ >

Imagen tomada de: https://www.repsol.com/pe_es/...y.../peasfaltos/.../composición/

2.2.3. Resinas

Son originadas por la condensación de anillos aromáticos suplantados por cadenas alifáticas cortas y contienen heteroátomos en proporciones pequeñas. Se considera que las resinas son el producto de una transición entre los compuestos polares y las fracciones relativamente no polares. Las resinas son responsables de proporcionar al asfalto sus propiedades cementantes y proceden como peptizantes de los asfáltenos. Además incrementan la susceptibilidad térmica, el punto de ablandamiento y en especial la ductilidad, reducen la penetración y el índice de penetración.¹⁸

Figura. 3. Resinas

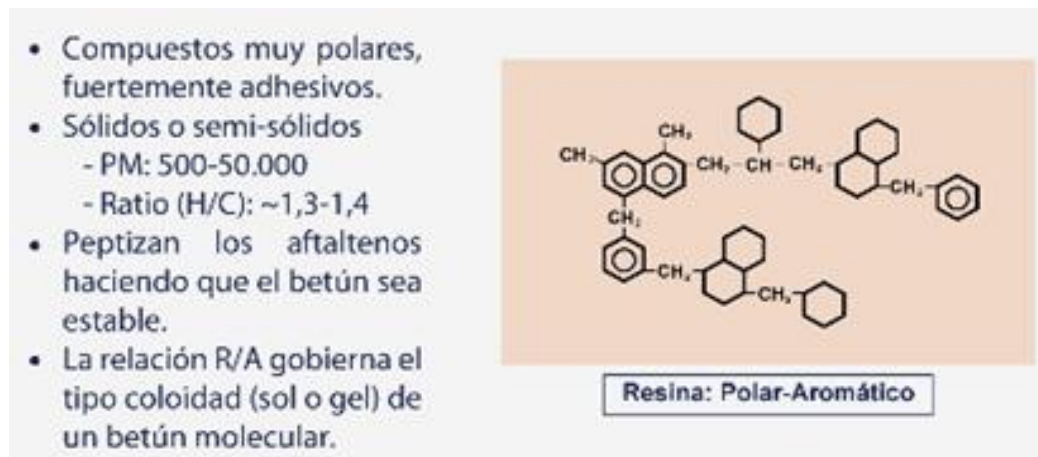


Imagen tomada de: https://www.repsol.com/pe_es/...y.../peasfaltos/.../composición/

¹⁸ Composición química de los asfaltos. En Línea. 2000-2016. Disponible en web < https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/ www.wordreference.com/definicion/asfalt/ >

2.2.4. Aromáticos

Constituyen la mayor proporción del medio de dispersión de los asfáltenos peptizados. Tienen poca influencia en el punto de ablandamiento y el índice de penetración, acrecientan la susceptibilidad térmica y dan lugar a flujo complejo en los asfaltos.

Figura 4. Aromáticos



Imagen tomada de: https://www.repsol.com/pe_es/...y.../peasfaltos/.../composición/

2.2.5. Saturados

Este tipo de hidrocarburos contiene entre 20 y 70 átomos de carbonos de hidrocarburos normales y de cadena ramificada, hidrocarburos saturados cíclicos y en una presencia pequeña de hidrocarburos aromáticos. En general, los saturados presentan pesos moleculares entre 300 y 800, y dentro de todas sus funciones se pueden mencionar algunas como: la disminución de la viscosidad y la susceptibilidad térmica, elevan la penetración, actúan como antioxidantes e impermeabilizantes y ocasionan deformación en el asfalto, entre otros.¹⁹

¹⁹ Composición química de los asfaltos. En Línea. 2000-2016. Disponible en web < https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/ www.wordreference.com/definicion/asfalt/ >

Figura 5. Saturados

- Aceites viscosos no polares.
- Compuestos mayoritariamente por cadenas lineales y/o ramificadas de hidrocarburos alifáticos con PM similar a los de los aromáticos.
- Muy baja reactividad.

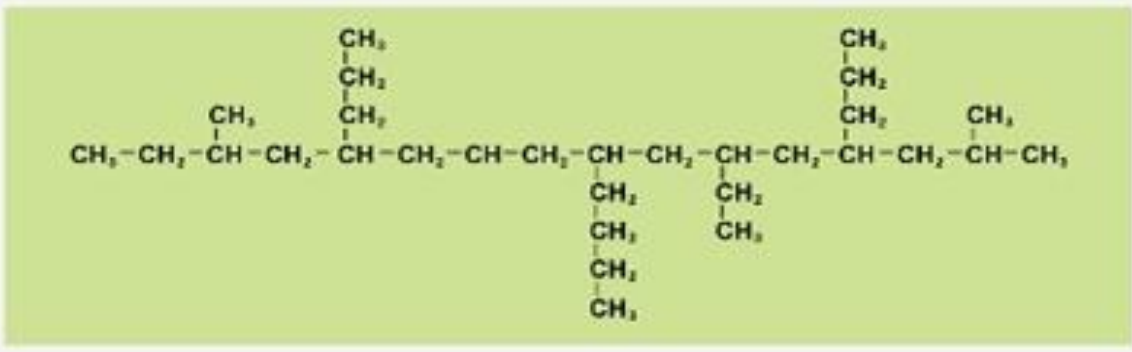


Imagen tomada de: https://www.repsol.com/pe_es/...y.../peasfaltos/.../composición/

2.3. CLASIFICACION DE LOS ASFALTOS

Se clasifica de acuerdo a su aplicación.

- Asfalto para pavimentación.
- Asfalto para uso industrial.

Figura 6. Clasificación de los asfaltos



Imagen tomada de: https://www.repsol.com/pe_es/...y.../peasfaltos/.../composición/

2.3.1. Asfaltos para pavimentación: Encontramos tres grandes grupos; en los cuales están:

➤ **Emulsiones Asfálticas:**

Las emulsiones asfálticas son una mezcla de Agua y Cemento, cada uno de estos ingredientes tiene una participación porcentual del 30-40% y 60-70% respectivamente. Se utilizan en tratamientos superficiales, como lo son riegos de adherencia, mezclas abiertas, estabilización de suelos y lechadas asfálticas.

De acuerdo a la velocidad de rotura de la emulsión se pueden dividir en:

- De rompimiento rápido.

- De rompimiento medio.
- De rompimiento lento.

➤ **Asfalto Líquido.** Se les conoce también con el nombre de asfaltos rebajados o “cut backs”, estos a su vez, están compuestos por una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil que puede ser bencina, kerosene o aceite. El solvente se aplica con el fin de aportar al asfalto la viscosidad necesaria poderlo mezclar con los agregados y trabajar a bajas temperaturas, habiendo elaborado la mezcla los fluidificantes se evaporan permaneciendo el residuo asfáltico que rodea y aglutina los agregados. La forma como se evapora el solvente es lo que determina si el tiempo de curado es lento (SC), medio (MC) o rápido (RC).²⁰

- SC: Asfaltos rebajados de curado lento.
- MC: Asfaltos rebajados de curado medio
- RC: Asfaltos rebajados de curado rápido

➤ **Cemento asfáltico:** Asfalto que resulta del proceso de la refinación del crudo, posee propiedades de aglutinamiento, flexibilidad y resistencia, además goza de una viscosidad apropiada para los trabajos de pavimentación. Se designa con las letras AC dependiendo de su penetración. Es excelente para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.

Son los más utilizados en pavimentación, y se pueden sub-clasificar bajo tres sistemas diferentes: viscosidad antes y después de envejecimiento y penetración. Se preparan comercialmente en grados o rangos de consistencia, de acuerdo con el ensayo de penetración, siendo este uno de los ensayos más comunes en la caracterización del asfalto; como ejemplo de su designación se tienen estos tres tipos de asfaltos: AC 70-90, AC-60-80, AC 80-100, donde los números indican la penetración en décimas de milímetro. ⁽⁶⁾

²⁰ Asfalto líquido. En Línea. 2000-2016. Disponible en web <

https://www.repsol.com/pe_es/productos_y_servicios/productos/peasfaltos/fisicoquimica/composicion/
www.wordreference.com/definicion/asfalt/ >

En el país, son principalmente empleados los cementos asfálticos con un rango de penetración 60-70 para climas cálidos y 80-100 para climas templados o fríos, puesto que, tras estudios realizados y basados en la experiencia, se ha podido definir que cuando se registran temperaturas elevadas, entre mayor sea el índice de penetración de este, los pavimentos flexibles tienden a desarrollar fallas por ahuellamiento.

Tabla 1. Rangos de penetración estándar

Rango	Penetracion estandar (0.01 mm)
AC 40-50	40-50
AC 60-70	60-70
AC 85-100	85-100
AC 120-150	120-150
AC 200-300	200-300

Fuente: Autores (Basado en MONTEJO, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002. p. 422.)}

2.3.2. Asfaltos Industriales:

Buscan mejorar la calidad del asfalto convencional mediante la utilización de polímeros. Se clasifican en dos grupos:

- **Asfaltos Oxidados:** Su objetivo es mejorar las características físicas como: incremento del peso específico y de la viscosidad, reducción de la susceptibilidad térmica y de la actividad.
- **Asfaltos Modificados:** Buscan mayor durabilidad, elasticidad y mejorar las características mecánicas con el fin de optimizar las propiedades de los asfaltos convencionales y mejorar los problemas producidos por el incremento de volumen del tránsito, la magnitud de las cargas y las condiciones climáticas.

En el país, son principalmente empleados los cementos asfálticos con un rango de penetración 60-70 para climas cálidos y 80-100 para climas templados o fríos, puesto que tras estudios realizados y basados en la experiencia, se ha podido definir que cuando se registran temperaturas elevadas, entre mayor sea el índice de penetración de este, los pavimentos flexibles tienden a desarrollar fallas por ahuellamiento.²¹

2.4. CARACTERIZACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS

Para determinar la calidad de un cemento asfáltico y caracterizarlo, es necesario realizar una serie de ensayos normalizados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), que muestran el comportamiento a escala real del material.

2.4.1. Ensayos efectuados a los cementos asfálticos:

- **Penetración (25°C, 100 g, 5 s) (0.1 mm):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E - 706 - 13). Este ensayo establece la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos en los cuales el único o el principal componente es un asfalto. La penetración se limita como la distancia, enunciada en décimas de milímetro hasta la cual penetra verticalmente en el material una aguja estándar en circunstancias definidas de carga, tiempo y temperatura. Habitualmente, el ensayo se ejecuta a 25°C (77°F) durante un tiempo de 5 s y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g, no obstante, se pueden utilizar otras condiciones que con antelación hayan sido definidas.
- **Índice de penetración:** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E - 724 – 13). Este valor de IP, creado por Pfeiffer y Van Doormal, se evalúa a partir de los valores de la penetración y del punto de ablandamiento, aportando de esta temperatura que se usan durante su aplicación.
- **Viscosidad absoluta (60° C) P:** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 716 – 13). Estos ensayos establecen el estado de fluidez del asfalto, en el nivel de temperaturas que se usan durante su aplicación.

²¹Asfaltos modificados. En Línea. 2000-2016. Disponible en web < <http://www.e-asphalt.com/modificados/modificados.htm> >

- **Ductilidad (cm):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 702 – 13). Este ensayo tiene por objeto la determinación de la ductilidad de los materiales asfálticos, de consistencia sólida y semisólida. El procedimiento consiste en someter una probeta del material asfáltico a un ensayo de tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad, definiéndose la ductilidad como la distancia máxima en cm que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.
- **Solubilidad en tricloroetileno (%):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 713 - 13). El ensayo permite la determinación del grado de solubilidad en tricloroetileno de materiales asfálticos que posean poco material mineral o que carezcan de él.
- **Contenido de agua (%):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 704 – 13). Busca determinar el contenido de agua de los materiales asfálticos; este proceso está basado en la destilación a reflujo de una muestra del material asfáltico, conjuntamente con un solvente volátil no miscible con el agua, el cual, al evaporarse, facilita el arrastre del agua presente, separándose de ella al condensarse.
- **Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland (°C):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 709 – 13). Con este ensayo se busca obtener el punto de llama, mediante la copa abierta de Cleveland, de productos de petróleo y de otros líquidos con excepción de los aceites combustibles y de los materiales que tienen un punto de ignición, en copa abierta de Cleveland, por debajo de 79°C (175°F).
- **Pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 min), (%):** Norma INVIAS 2013 (I.N.V.E – 709 – 13). Este ensayo se realiza para medir el efecto del calor y del aire, sobre una lámina delgada en movimiento, de materiales asfálticos semisólidos. Los efectos de este procedimiento se determinan a partir de la medición de ciertas propiedades del asfalto, antes y después del ensayo. El procedimiento consiste en calentar la película de material asfáltico en movimiento en un horno a 163°C (325°F), durante 75 minutos. Los efectos del calor y del aire son determinados a partir de los cambios, en los valores de los ensayos físicos efectuados antes y después del tratamiento en el horno.

Tabla 2. Especificaciones para cementos asfálticos

CARACTERISTICA	NORMA DE ESNAYO INV	GRADO DE PENETRACION					
		40-50		60-70		80-100	
		MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
ASFALTO ORIGINAL							
Penetración (25°C,100g,5s),0,1 mm	E-706	40	50	60	70	80	100
Punto de ablandamiento, °C	E-712	52	58	48	54	45	52
Índice de Penetración	E-724	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6	-1.2	+0.6
Viscosidad Absoluta (60°)P	E-716 o E-717	200		150		100	
Ductilidad -825°C,5cm/min),cm	E-702	80		100		100	
Solubilidad en tricloroetileno,%	E-713	99		99		99	
Contenido de agua,%	E-704		0.2		0.2		0.2
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland,°C	E-709	240		230		230	
Contenido de parafinas,%	E-718		3		3		3
ASFALTO RESIDUAL, LUEGO DE LA PRUEBA DE ACONNDICIONAMIENTO EN PELICULA DELGADAD ROTATORIA, NORMA DE ENSAYO INV E-720							
Pérdida de masa por calentamiento,%	E-720		0.8		0.8		1
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E-706	55		50		46	
Incremento en el punto de ablandamiento, °C	E-712		8		9		9
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60°C) del asfalto residual y el asfalto original	E-716 o E-717		4		4		4

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Art. 410.

“Los siguientes ensayos están relacionados en la tabla 410-1 Especificaciones del cemento asfáltico; Norma INVIAS especificaciones generales de construcción de carreteras.”²²

2.5. CONTENIDO DEL ASFALTO:

La porción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio y luego controlada con precisión en la obra.

El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios dictados por el método de diseño seleccionado.

Depende, en gran parte de las siguientes características del agregado: La granulometría del agregado está directamente relacionada con el mismo. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente todas las partículas.

La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto, es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan el tamiz No. 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral pueden absorber literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda).

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla, es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que añadir suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto.

Los técnicos hablan de dos tipos de asfaltos: Contenido total de asfalto: Es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la misma. Contenido efectivo de asfalto: Es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma película

²² Instituto Nacional de Vías. Normas Invias.2013

ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. Se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto.²³

3. ESCORÍA DE ACERO

La escoria de horno es un subproducto derivado de la fabricación del arrabio (materia prima para la elaboración del acero), la cual se genera en hornos de siderurgias. Es usada como material en la construcción de carreteras como agregado en mezclas asfálticas y en otras aplicaciones como concreto hidráulico, en Estados Unidos, México, Venezuela y otros países. Se estima que entre 7.0 y 7.5 millones de toneladas métricas están siendo utilizadas cada año en los Estados Unidos.

La escoria de acero es un subproducto de la siderurgia, se produce durante la separación del acero fundido de impurezas en hornos siderúrgicos. Es una solución compleja de silicatos y de óxidos que solidifica al enfriarse.

Figura 7. Escoria de acero



Fuente: Autor

²³ ARENAS LOZANO, Hugo León. *Tecnología del cemento asfáltico*. Popayán: Litocenco Ltda., 5ª edición., 2006. p.32

El uso de la escoria en obras civiles es una práctica antigua, está incluida en las especificaciones de construcción vial de varios países, y en su manejo son aplicables los equipos de construcción que se utilizan para cualquier agregado.

En el Reino Unido se ha utilizado en capas bases y pavimentos asfálticos, las calles del norte de Londres y áreas alrededor de Coventry y Birmingham han sido pavimentadas con escoria durante más de 50 años.

En Estados Unidos la experiencia supera los cuarenta años, cabe citar que, debido a los buenos resultados con el uso del agregado, las autoridades aeronáuticas, hace varios años autorizaron la utilización de 750,000 toneladas de escoria de acería para la base de la pista de aterrizaje del aeropuerto internacional de Pittsburg, el que ha cumplido su función desde entonces. 6 Son también utilizadas frecuentemente en Australia, Japón, India, México, Brasil, Chile y algunos países europeos. En Brasil la pavimentación de la nueva ciudad de Mogi das Cruces, Sao Paulo, se hizo enteramente con escoria de acería, con excelentes resultados. La Br381, una de las carreteras más transitadas del país, fue asfaltada en gran parte con escoria. En el sur de Chile, carreteras que tienen que soportar el gran peso por eje de camiones que sirven a la industria maderera, están usando escoria en las bases. Además del uso en mezclas asfálticas, la escoria se aplica extensamente como riego de sello en obras de tratamiento superficial.

La escoria presenta excelentes propiedades en su empleo como tratamiento superficial, entre estas: Su alto y permanente valor de coeficiente de roce, proporciona mayor agarre entre el pavimento y los neumáticos de los vehículos, es decir menor posibilidad de patinaje. La permanencia del color oscuro, significa mayor visibilidad de la demarcación horizontal. Excelente afinidad hacia el asfalto, es decir su excelente adherencia, no se desprende de la superficie del tratamiento ante el efecto del tráfico. Compatibilidad con cualquier tipo de asfalto, desde los cementos asfálticos hasta las emulsiones. Alta resistencia al pulimento, lo que garantiza también que se mantiene la forma irregular y la textura áspera de las partículas, con su beneficio adicional sobre la buena adherencia.²⁴

²⁴ M BOZA REGUERÍA. Revista estudiantil. 2011. Artículo 536

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ESCORIA DE ACERÍA

Cuando la escoria líquida es sometida al proceso de trituración por agua, se forman fragmentos cúbicos con muy pocas partículas alargadas. Esta angularidad, combinada con su textura rugosa y peso hacen de ella un material ideal para balasto de vías férreas, bases granulares de carreteras, pavimentos asfálticos, tratamientos superficiales y sellos. Una de las observaciones frecuentes que hacen los que por primera vez conocen la escoria, es que se puede “oxidar”, quizás por considerar que este material proviene del proceso de producción del acero. Vale la pena destacar, que de acuerdo a la definición de este material: “mezcla de óxidos y silicatos fundidos” ya la oxidación se completó totalmente y en consecuencia no puede progresar más.

Por su textura rugosa y angular producen superficies de rodamiento antiderrapantes, que mantienen esta característica con el tiempo, por lo cual son ampliamente utilizadas en sellos y tratamientos superficiales.

Se ha observado que la escoria tiene la capacidad de retener el calor en períodos de tiempo considerablemente más largos que los agregados naturales tradicionales, esta característica resulta ventajosa en las mezclas asfálticas, conservando la temperatura por mayor tiempo.²⁵

Tabla 3. Propiedades físicas de la escoria de Acero

Propiedad	Valor
Gravedad específica	3.2 – 3.6
Peso unitario kg/m ³ , (lb/ft ³)	1600 - 1920 (100 - 120)
Absorción	Arriba de 3%

Fuente:// : <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm//>

²⁵ Característica Escoria de Acería. [En Línea] Disponible en web< <https://es.scribd.com/doc/.../Composicion-Quimica-Tipica-de-las-Escorias-de-Aceria> >

Tabla 4. Propiedades mecánicas típicas de la escoria de Acero

Propiedad	Valor
Abrasión Los Angeles (ASTM C131), %	20 - 25
Desintegración al sulfato de sodio (ASTM C88), %	<12
Ángulo de fricción interna.	40° - 50°
Dureza (medida en la escala de Mohs)	6 - 7
California Bearing Ratio (CBR), % tamaño máximo 19 mm (3/4 de pulgada)	Arriba de 300

Fuente:// <http://www.tfhr.gov/hnr20/recycle/waste/ssa1.htm//>

3.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La composición química de las escorias usualmente se expresa en términos referentes a óxidos simples, la forma mineralógica de las escorias y las proporciones relativas de estos compuestos son muy dependientes del proceso de fabricación del acero y la manera en que son enfriadas, los compuestos predominantes son silicatos de calcio, el óxido de calcio, calcio, magnesio, óxido férrico, cal libre y magnesio libre.²⁶

²⁶ Característica Escoria de Acería. [En Línea] Disponible en web< <https://es.scribd.com/doc/.../Composicion-Quimica-Tipica-de-las-Escorias-de-Aceria> >

3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE ESCORIA EN PROYECTOS VIALES

3.3.1 Desventajas

Su alto valor de peso unitario en estado suelto (mayor a 1900 kg/m³) y al ser compactada como mezcla asfáltica (cercano a los 3000 kg/m³) pueden incidir en el costo adicional en el transporte y en el valor de mezcla asfáltica por m².

Algunos contratistas han esgrimido que, por provenir del acero, ocasiona un desgaste más rápido de los elementos de trabajo, esto no ha sido tomado en cuenta ya que no se ha registrado esta diferencia.

3.3.2 Ventajas

3.3.2.1 En mezclas asfálticas

El uso de escoria en mezclas asfálticas, brinda a los pavimentos características que mejoran su desempeño con respecto a los elaborados con agregados tradicionales. Algunas de estas son:

- Alta resistencia al deslizamiento a lo largo de su vida de servicio. Valores típicos de resistencia al deslizamiento (Skin Nombre SN) de 56 después 235,000 ciclos y de 51 después de 1,500,000 ciclos.
- Permanencia en el color de la mezcla a través del tiempo, lo cual garantiza mejor visibilidad de la señalización horizontal.
- La característica de mayor retención de la temperatura de la mezcla (menor tasa de enfriamiento) significa que pueden lograrse mezclas con menor temperatura inicial en el caso de grandes distancias de acarreo. Esta propiedad también ayuda en la trabajabilidad de la mezcla durante su colocación, ya que se alargan los períodos de compactación.
- Estabilidad Marshall elevada, presentando menores posibilidades de fallas por ahuellamiento.
- Excelentes propiedades de afinidad con el cemento asfáltico, lo cual significa muy poca “denudación de la mezcla” ante los efectos del clima y tráfico.

- El bajo costo de la escoria la hace competitiva ante las mezclas convencionales, aun cuando su mayor peso unitario actúa en su contra.

3.3.2.2 En tratamientos superficiales

La escoria presenta excelentes propiedades en su empleo como tratamiento superficial, entre estas: Su alto y permanente valor de coeficiente de roce, proporciona mayor agarre entre el pavimento y los neumáticos de los vehículos, es decir menor posibilidad de patinaje. La permanencia del color oscuro, significa mayor visibilidad de la demarcación horizontal. Excelente afinidad hacia el asfalto, es decir su excelente adherencia, no se desprende de la superficie del tratamiento ante el efecto del tráfico. Compatibilidad con cualquier tipo de asfalto, desde los cementos asfálticos hasta las emulsiones.

Alta resistencia al pulimento, lo que garantiza también que se mantiene la forma irregular y la textura áspera de las partículas, con su beneficio adicional sobre la buena adherencia.²⁷

3.3.2.3 En bases granulares

La escoria de acería conforma el mejor agregado que pueda ser utilizado en la construcción de bases granulares, ya sea en mezclas 100% escoria o en mezclas con polvillo de cantera o arena, debido a:

- Bajo costo comparado con cualquier otro material pétreo de la zona.
- Excelente valor de CBR (150%-300% en la escoria contra 85%-100% en los agregados pétreos tradicionales) proporcionando mayor durabilidad ante la misma intensidad de cargas y espesor de construcción o la posibilidad de reducir el espesor de la capa de base.
- Permanencia de la estabilidad de la base granular, debido a la mayor resistencia mecánica de la escoria.
- Mejor comportamiento ante el efecto del agua, debido a la inexistencia de fracción fina plástica en las escorias.

²⁷Tratamientos con Escoria de Acería. [En línea]. Octubre 2014.Disponible en web < http://api.eoi.es/api_v1/dev.php/fedora/asset/eoi:78533/componente78531.pdf >

Reducción de los espesores de pavimentos asfálticos requeridos sobre una capa base de escoria.

4. MATERIAL GRANULAR

Los agregados pétreos son minerales inertes y duros, empleados en fragmentos para la construcción de pavimentos. Se utilizan también en la construcción de base y sub - base granular sirviendo como estructura de soporte a los pavimentos; a su vez, se combina en tamaños gruesos (gravas), tamaño fino (arenas) y una llenante mineral (filler).

Se definen tres clases de capas granulares para base, que se denominan Clase A (BG_A), Clase B (BG_B) y Clase C (BG_C); también se definen tres clases de capas granulares para sub-base, que se denominan Clase A (SBG_A), Clase B (SBG_B) y Clase C (SBG_C). Los tipos (Base o Sub-base) y clases (A, B o C) de capas granulares por emplear en cada caso se establecerán en los documentos técnicos del proyecto, en función de la importancia de la vía, del nivel de tránsito, del tipo de pavimento y de la posición de la capa dentro de la estructura del pavimento.²⁸

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Los agregados pétreos que son utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas en caliente, deben contar con propiedades específicas, que, al emplear una capa del material asfáltico, ésta no se desprenda por la acción combinada del agua y del tránsito.²⁹

4.1.1 Agregado grueso

Se llama agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4,75 mm (No.4). Este agregado deberá provenir de la desintegración de roca, de grava

²⁸Instituto de Desarrollo Urbano. IDU. [En Línea]. 10 de octubre de 2016. Disponible en web < <https://www.idu.gov.co/documents/.../7d48eec3-3715-47aa-8515-01bb1bec9e22> >

²⁹Clasificación de los agregados. [En Línea]. 20 de octubre de 2016. Disponible en web < Instituto de Desarrollo Urbano. IDU. [En Línea]. 10 de octubre de 2016. Disponible en web < <https://www.idu.gov.co/documents/.../7d48eec3-3715-47aa-8515-01bb1bec9e22> >

o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin presencia exagerada de partículas planas, alargadas, blandas o desintegrables, deberá estar exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias que puedan impedir la adhesión completa del asfalto o afecten adversamente la durabilidad de la mezcla compactada.

4.1.2 Agregado fino

Se llama agregado fino a la porción del agregado comprendida entre los tamices No. 4 y N 200. “Deberá proceder en su totalidad de la trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. La proporción de arena natural no podrá exceder del quince por ciento (15 %) de la masa total del agregado combinado, cuando el tránsito de diseño sea superior a cinco millones ($> 5 \cdot 10^6$) de ejes equivalentes de 80 ken en el carril de diseño, ni exceder de veinticinco por ciento (25 %) para tránsitos de menor intensidad. En todo caso, la proporción de agregado fino no triturado no podrá exceder la del agregado fino triturado”³⁰

4.1.3. Llenante Mineral

La llenante mineral es la porción del agregado que pasa el tamiz de 75 mm (No.200), este será de polvo de piedra caliza, cenizas de carbón o de fundición, cemento Portland u otro material mineral inerte. Debe estar seco y libre de terrones.

“El llenante mineral podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o podrá ser aporte como producto comercial, generalmente Cal hidratada o cemento hidráulico.”³¹

El agregado fino puede proceder de un proceso de trituración de piedra de cantera o de grava natural, o de fuentes naturales de arena. La llenante mineral o filler puede provenir de los agregados pétreos, sometidos a un proceso de tamizado y posterior clasificación.

³⁰Instituto Nacional de Vías, INVIAS. *Especificaciones generales de construcción de carreteras*, Artículo 400.2.1.2.1 2013.

³¹ Art. 400.2.1.2.3, INVIAS. *Especificaciones técnicas para los agregados y llenante mineral*.

4.1.4. Ensayos realizados a los agregados pétreos según las normas INVIAS 2013:

- **Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos I.N.V.E - 213.**
Tiene como fin determinar la distribución de tamaños de los agregados pétreos, estos son separados por medio de unos tamices predeterminados por el diseño de la mezcla asfáltica.
- **Peso específico y absorción de agregados finos I.N.V.E - 222.**
Describe el proceso que debe seguirse para determinar El peso específico aparente y real, así como la absorción que presentan a las 24 horas de estar sumergidos en agua.
- **Peso específico y absorción de agregados gruesos I.N.V.E - 223.**
Este método describe el proceso por medio del cual se determina el peso específico aparente y nominal, así como la absorción que presentan a las 24 horas de estar sumergidos en agua, esta caracterización se realiza con agregados que sean retenidos por el tamiz de 4,75mm o N°4
- **Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles I.N.V.E - 218.** El proceso describe el sometimiento a desgaste por medio de la máquina de Los Ángeles de los agregados gruesos máximo de 1 ½" por medio de una carga abrasiva colocada en la máquina.
- **Porcentaje de caras fracturadas en los agregados I.N.V.E - 227.**
Determina qué porcentaje en peso del agregado pétreo presenta una o más de las caras fracturadas.
- **Equivalente de arena de suelos y agregados finos I.N.V.E - 133.** Este ensayo presenta el objetivo de determinar la cantidad de polvo arcilloso en la parte de agregado fino. Debido a que este tipo de suelos es nocivo para las mezclas.
- **Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras I.N.V.E - 230.** Describe el procedimiento que debe seguirse, para la determinación de las relaciones de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de vías.

Tabla 5. Requisitos de los agregados pétreos para un nivel de transito NT2

MEZCLA DENSA EN CALIENTE		
ENSAYO	Agregado grueso	Agregado fino
Desgaste Los Ángeles E-218E-219	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (intermedia y base)	N.A
Desgaste Micro-deval	25% máx. (Rodadura) 35% máx. (intermedia y base)	N.A
Sulfato de Sodio - Magnesio E-220	12 % máx. - 18% máx.	12 % máx. - 18% máx.
Partículas Fracturadas E-227	75/60 (rodadura) 75% (intermedia) 60% (base)	N.A
Angularidad Método A (Agregado fino) E-239	N.A	45% min. (Rodadura) 40% Min (intermedia) 35% min. (base)
Coeficiente de pulimiento acelerado	0,45 min. (rodadura)	N.A
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	10% máx.	N.A
Equivalente de Arena	N.A	50% min.
Contenido de impurezas (Agregado grueso)	0,5% máx.	N.A

Fuente. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 400. 2013.

5. MEZCLAS ASFÁLTICAS

“Las mezclas asfálticas están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonado. Se producen en centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y compactan. Se usan en la

construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los pavimentos para tráfico pesado intenso. Están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5% de polvo mineral (filler) y otro 5% de ligante asfáltico. Estos son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta al conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.

El principal objetivo al modificar asfaltos es mejorar sus propiedades reológicas no obtenidas en los asfaltos producidos con técnicas convencionales de refinación.”³²

Generalmente una mezcla es el resultado de la combinación de cemento asfáltico y agregados pétreos en unas proporciones exactas y predeterminadas; se pueden fabricar en caliente o en frío, siendo más usuales las Mezclas densas en caliente. Se conocen una serie de procedimientos para calcular las cantidades de cada material en la mezcla en caliente, siendo el procedimiento Marshall uno de los métodos más usados y confiables.

Sirve como agente cementante que fija los agregados en la posición adecuada para transmitir las cargas aplicado a las capas inferiores. Los agregados son por lo general piedra partida, grava, arenas, etc.³³

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las siguientes son características más notables en una mezcla asfáltica son:

- **Estabilidad:** Es la capacidad para resistir la deformación bajo las cargas del tránsito. Un pavimento inestable presenta ahuellamientos, corrugaciones y otras señales que indican cambios en la mezcla.
- **Durabilidad:** Es la capacidad para resistir la acción de los agentes climáticos y del tránsito, que se observa en desintegración del agregado,

³²(Asfalta, asfaltos de centro américa, 2006)

³³ RONDON QUINTANA, Hugo. Serie de guías: Fundamentos 1. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Edición 1, 2009. Pg. 45.

cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.

- **Impermeabilidad:** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia el interior del pavimento.
- **Flexibilidad.** Es la capacidad del pavimento para acomodarse sin agrietamientos, a movimientos y asentamientos graduales de la subrasante.
- **Resistencia a la fatiga.** Es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito. Expresa la capacidad de la mezcla a deformarse repetidamente sin fracturarse.
- **Resistencia al deslizamiento.** Capacidad de proveer suficiente fricción para minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada ³⁴.

Según las especificaciones del INVIAS (2013). Se muestran algunos tipos de mezclas como: Mezcla densa en frío, Mezcla abierta en frío, Mezcla densa en caliente, Mezcla abierta en caliente, entre otras. Conforme sea la gradación de la mezcla, así mismo será la utilidad que preste, es decir, se puede emplear como bases o carpetas de rodadura.

Las mezclas asfálticas pueden ser clasificadas dependiendo del tipo de asfalto, la cantidad de agregados en la mezcla, la gradación de los materiales y el proceso de fabricación. En cuanto a la fabricación, las mezclas calientes se elaboran en una planta de mezclas asfálticas y las mezclas en frío se pueden fabricar in situ.

5.2 MEZCLAS DENSAS EN CALIENTE (MDC)

Se define como mezcla asfáltica (o bituminosa) en caliente a la combinación de áridos (incluido el polvo mineral) con un gigante; estas mezclas están conformadas por ligantes pétreos, ligante bituminoso, en ciertos casos agua y adiciones. Las cantidades relativas de ligante y áridos determinan las propiedades físicas de la mezcla. El proceso de fabricación implica calentar el agregado pétreo y el ligante a alta temperatura, muy superior a la ambiental. Enseguida esta mezcla es colocada en la obra.

³⁴ASOPAC, *Cartilla del pavimento asfáltico. Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia 2004.P.21*

Puede ser colocada como capa de base o de rodadura; esta última capa tiene la responsabilidad de brindar durabilidad, comodidad y seguridad de los usuarios y además es la que va a soportar de manera completa las cargas aplicadas tanto verticales como horizontales.

Para que las mezclas sean de alta calidad deben tener drenabilidad, buena adherencia, agregado o ligante, buena resistencia a la deformación plástica y homogeneidad. Cada capa de rodadura debe cumplir con las funciones de eliminar las vibraciones molestas a elevadas velocidades.³⁵

“Las mezclas asfálticas en caliente son las más empleadas en muchas partes del mundo, debido a su flexibilidad, duración, uniformidad, resistencia a la fatiga y economía entre otras características, generando por ende investigaciones y desarrollos para mejorar sus propiedades mecánicas y dinámicas. Muchos de los adelantos se han enfocado en el proceso constructivo de la conformación de las carpetas de rodadura, prueba de ello es la utilización de equipos costosos que mantienen la temperatura constante en el proceso de extendido y compactación.

De otra parte, el acelerado desarrollo automotriz y el intercambio de bienes y servicios han conducido a construir vías que soportan mayor número de ejes equivalentes y cargas con el empleo de materiales modificados y estricto control de obra”³⁶.

Se tienen que considerar dos aspectos fundamentales en el diseño:

- La Función Resistente, que determina los materiales y los espesores de las capas que habremos de emplear en su construcción.
- La Finalidad, que determina las condiciones de textura y acabado que se deben exigir a las capas superiores del firme, para que resulten seguras y confortables. A estas capas superiores se le denomina pavimento.

Estas mezclas densas en caliente son utilizadas normalmente como carpeta de rodadura.

“Se obtiene por medio de una composición de agregados gruesos triturados, agregado fino y llenante mineral, uniformemente mezclados en caliente, con

³⁵ Mezclas densas en caliente. [En Línea]. Disponible en web < <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asf%C3%A1lticas.pdf> >

³⁶ ORTIZA REYES, Óscar Javier. CAMACHO TAUTA, Javier Fernando y LIZCANO, B. Freddy. *Influencia de la Temperatura y Nivel de Compactación en las Propiedades Dinámicas de una mezcla Asfáltica*. Medellín: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006. p. 126.

cemento asfáltico, en una planta especializada, con métodos de control que permiten asegurar la correcta dosificación de los componentes, o en laboratorio para determinar sus cualidades. MDC1, MDC-2, MDC-3. ”³⁷

Tabla 6. Granulometrías típicas para mezclas densas en caliente

TIPO DE MEZCLA	TAMIZ (mm/U.S.Standard)										
	37,5		25	19	12,5	9,5	4,75	2	0,425	0,18	0,075
	1 1/2"		1"	3/4"	1/2"	3/8"	N°.4	N°.10	N°.40	N°.80	N°.200
	% PASA										
DENSAS	MD C-1		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8.0-17	4.0-8
	MD C-2			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8.0-17	4.0-8
	MD C-3					100	65-87	43-67	16-29	9.0-19	5.0-10

Fuente: Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 450. 2007. P.3

Los tipos de mezclas densas en caliente son definidos por el Instituto Nacional de vías INVIAS (2013) y estas a su vez deben tener diferentes adiciones de agregados pétreos.

La selección del cemento asfáltico a utilizar en una mezcla asfáltica en caliente está sujeta a dos parámetros de diseño como son: las características climáticas de la zona y las condiciones de operación de la vía, dichas características son:

³⁷ MARTINEZ Y ABELLA, *Comportamiento de mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2 sometidas a cambios de temperatura. Trabajo de grado, Ingeniería Civil. Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. Programa de ingeniería Civil. 2008. P. 35.*

Tabla 7. Criterios de selección del cemento asfáltico

TIPO DE CAPA	NT1			NT2			NT3		
	TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA REGION								
	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15	>24	15-24	<15
RODADURA E INTERMEDIA	60-70	60-70 80-100	80-100	60-70	60-70 80-100	80-100	60-70 TIPO II (a O b)	60-70 TIPO II (a O b)	60-70 80-100 o TIPO Iribú
BASE	NA			60-70 80-100	60-70 80-100	80-100	60-70	60-70 80-100	80-100
ALTO MÓDULO	NA			NA			TIPO V		

Fuente. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, tabla 450 2013.

“El Instituto nacional de vías, como ente promovedor y regulador del desarrollo vial en el país, establece como método para el diseño de mezclas densas en caliente el método de diseño Marshall (I.N.V.E - 748), salvo de justificarse lo contrario o de especificarse otro método. En la Tabla 6, se muestran los valores límites a los que están sujetas las características propias de las mezclas en caliente, dependiendo del tipo de mezcla y del nivel de tránsito.”³⁸

³⁸ Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 400.2.1.2.1 2013.

Tabla 8. Diseño de mezcla y obtención de la fórmula de trabajo

CARACTERISTICA		NORMA ENSAYO INV	MEZCLA DENSA, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MODULO
			CATEGORIA DE TRANSITO			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748	50	75	75	75
Estabilidad mínima (Kg)		E-748	500	750	900	1500
Flujo (mm)		E-748	2,0-4	2,0-4	2-3,5	2,0-3
vacíos con aire (Va)*,%	Rodadura	E-736 o E-799	3,0-5	3,0-5	4,0-6	*
	Intermedia		4,0-8	4,0-8	4,0-7	4,0-6
	Base		*	5,0-9	5,0-8	*
vacíos en los agregados minerales (VAM), %	Mezclas 0	E-799	≥13	≥13	≥13	*
	Mezclas 1		≥14	≥14	≥14	≥14
	Mezclas 2		≥15	≥15	≥15	*
	Mezclas 3		≥16	≥16	≥16	*
% de vacíos llenos de asfalto (VFA) (volumen de asfalto efectivo/vacíos en los agregados minerales)x 100 capas de rodadura e intermedia		E-799	65-80	65-78	65-75	63-75
Relación llenante/ asfalto efectivo, en peso		E-799	0,8-1,2			1,2-1,4
concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor critico			

Fuente. Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras.

5.2.1 Calidad de Mezcla Densa en Caliente (MDC)

5.2.1.1 Resistencia

“El artículo 450 - 07 del INVIAS, decreta la verificación de briquetas (probetas) de asfalto, con un mínimo de dos para cada lote de producción con el fin de verificar en el laboratorio su resistencia en el ensayo Marshall (I.N.V.E - 748) ”.³⁹

La estabilidad media de las probetas (E_m) deberá ser como mínimo, igual al noventa por ciento (90%) de la estabilidad de la mezcla de la fórmula de trabajo (E_t).

Además, la estabilidad de cada probeta (E_i) deberá ser igual o superior a ochenta por ciento (80%) del valor medio de estabilidad, admitiéndose solo un valor individual por debajo de ese límite.

Adicionalmente, con un mínimo de dos (2) muestras por lote de la mezcla elaborada, se moldearán probetas (tres por muestra), para verificar en el laboratorio la resistencia de la mezcla ante la acción del agua mediante el ensayo de inmersión - compresión (INVIAS E-738). Tres de las probetas se curarán en seco y tres bajo condición húmeda y se determinará la resistencia promedio de cada grupo. La pérdida de resistencia por efecto de la inmersión, no podrá exceder de veinticinco por ciento (25 %).

El incumplimiento de al menos una de estas exigencias implica el rechazo del lote representado por las muestras.

El flujo medio de las probetas sometidas al ensayo de estabilidad (F_m) deberá encontrarse entre el ochenta y cinco por ciento (85%) y el ciento quince por ciento (115%) del valor obtenido en la mezcla aprobada como fórmula de trabajo (F_t), pero no se permitirá que su valor se encuentre por fuera de los límites establecidos en el aparte 450.4.2.

³⁹ Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras, Artículo 400.2.1.2.1 2013.

Si el flujo medio se encuentra dentro del rango establecido en el aparte 450.4.2, pero no satisface la exigencia recién indicada en relación con el valor obtenido al determinar la fórmula de trabajo, el Interventor decidirá, al compararlo con las estabilidades, si el lote debe ser rechazado o aceptado.

5 .3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADHERENCIA AGREGADO-ASFALTO

5.3.1. Tensión superficial. Puede ser líquido o sólido. En el líquido sobretodo la capa próxima a la superficie del líquido actúan fuerzas normales a ella dirigidas hacia el interior, es decir que la capa superficial ejerce sobre el líquido una presión que se llama tensión molecular, lo que ocasiona fuerza repulsiva y equilibra la compresión originada por la capa superficial.

Si una masa de líquido no recibe fuerzas exteriores adopta una forma esférica (por la presión de la fuerza molecular) teniendo así por su forma menos superficie y esto es análoga a la que se producirá si la superficie del líquido fuera una película estirada que tiende a contraerse.

Por lo tanto, la tensión superficial de un líquido influye en el fenómeno de la adherencia, ya que la fuerza y la intensidad presentada influye en mayor o menor facilidad para que el líquido realice el mojado del agregado.

La tensión superficial liquido – sólido se evidencia si se presenta una fuerza de superficie ente el límite de un líquido y un sólido, donde hay un estado de tensiones en la superficie del líquido.⁴⁰

5.3.2. Angulo de contacto. Este se presenta entre un líquido y un solidó cuando el asfalto entra en contacto con el agregado pétreo, se deben tener en cuenta las fuerzas que actúan entre las moléculas de ambos, pudiendo ocurrir dos cosas. La primera que hace que la fuerza del asfalto líquido sea mayor que las del agregado pétreo; cuando se presenta esto el líquido no moja el sólido, ya que la fuerza está dirigida al líquido.

En condiciones de reposo el líquido se dispone perpendicularmente a la fuerza, resultando que el líquido que no moja toma junto a la pared vertical sólida forma de ángulo de contacto o de capilaridad.

⁴⁰ REVISTA INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN. 2002. Vol 17 N°2

La segunda hace referencia a las fuerzas intermoleculares del asfalto (cohesión) que son menores que las que actúan entre sus moléculas y las del cuerpo sólido (adherencia). En este caso el líquido moja el cuerpo sólido, la fuerza está dirigida hacia el sólido y como resultado la superficie del líquido toma junto a la pared vertical la posición de ángulo agudo o nulo, el líquido moja perfectamente cuando es igual a 0° .

5.3.3. Viscosidad. Es la resistencia que ofrece el cemento asfáltico a la deformación por el rozamiento de las moléculas por lo cual a más elevada sea la viscosidad más lento será el movimiento. El asfalto debe actuar como adhesivo entre el agregado pétreo que conforma la carpeta de rodadura y por ser termoplásticos, ya que al calentarse disminuye su consistencia y endurece cuando se enfrían.

Si se aumenta la viscosidad la cobertura del agregado es más lenta y puede ser perjudicial porque el ligante no alcanza la superficie del agregado pétreo en especial cuando tiene polvo ya que esta es la que va a ser recubierta por el asfalto y no el agregado.⁴¹

5.4. MÉTODO DE DISEÑO MARSHALL

5.3.2. Antecedentes

El concepto del método Marshall de diseño de mezclas de pavimentación fue desarrollado por Bruce Marshall, ex-ingeniero de la sección de bitúmenes del Departamento de carreteras del estado de Mississippi. Surgió de una investigación iniciada por el cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos en 1943. Varios métodos fueron comparados y evaluados para desarrollar uno simple. A través de una extensa investigación de pruebas de tráfico y estudios de correlación en el laboratorio, el Cuerpo de Ingenieros mejoró y agregó ciertos detalles al procedimiento y posteriormente desarrolló los criterios de diseño de mezclas. El Cuerpo de Ingenieros decidió adoptar el método Marshall, para diseño y control de pavimentos asfálticos en el campo, debido en parte a que este utiliza equipo portátil.

⁴¹ Viscosidad de Asfalto. [En Línea]. Disponible en web <
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf> >

5.3.2. Propósito

Determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. También provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, establece densidades y contenidos óptimos de vacíos que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

5.3.3 Norma INVIAS E-748-13

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia a la deformación plástica de especímenes cilíndricos de mezclas asfálticas para pavimentación, empleando el aparato Marshall. El procedimiento se puede emplear tanto para el proyecto de mezclas en el laboratorio como para el control en obra de las mismas. El método es aplicable a mezclas elaboradas con cemento asfáltico y agregados pétreos con tamaño máximo menor o igual a 25.4 mm (1”).

El Método de diseño Marshall está regulado por la norma INVIAS 2013(I.N.V.E - 748 – 13), medidas que se refieren al procedimiento que debe emplearse para fijar la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas para la pavimentación. Este método puede emplearse tanto para mezclas en laboratorio como para la inspección en obra de las mismas. Las etapas abarcadas básicamente en el método Marshall son:

- a) Definir las especificaciones acerca de la granulometría y el porcentaje de asfalto empleado.
- b) Caracterizar los agregados y el cemento asfáltico.
- c) Fabricar las briquetas.
- d) Determinar el peso específico bulk o densidad bulk de las briquetas.
- e) Analizar la estabilidad y flujo de las briquetas.
- f) Determinar por medio de las curvas obtenidas el porcentaje óptimo de cemento asfáltico en la mezcla.
- g) Determinar los criterios de diseño.

El procedimiento consiste en la fabricación de probetas cilíndricas de 101,6 mm (4") de diámetro y 63,5 mm (2½") de altura, preparadas como se describe en esta norma, rompiéndolas posteriormente en la prensa Marshall y determinando su estabilidad y deformación. "Si se desean conocer los porcentajes de vacíos de las mezclas así fabricadas, se determinarán previamente los pesos específicos de los materiales empleados y de las probetas compactadas, antes del ensayo de rotura, de acuerdo con las normas correspondientes"⁴².

Este método inicia con la elaboración de probetas de prueba, para lo cual los materiales planteados deben cumplir con las especificaciones de granulometría y demás, establecidas para el proyecto. Sumado a esto, deberá establecerse con antelación el peso específico aparente de los agregados, así como el peso específico del asfalto, y el análisis de Densidad-Vacíos.

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla para una gradación de agregados específica, se deberá elaborar una serie de probetas con distintos porcentajes de asfalto, de tal manera que, al graficar los valores obtenidos después de ser ensayadas, permitan encontrar ese valor óptimo.

El aparato para moldear probetas consiste básicamente en una placa de base plana, con molde y collar de extensión cilíndricos. El molde debe tener un diámetro interno de 101,6 mm (4") y altura promedio de 76,2 mm (3"); la placa de base y el collar de extensión deberán ser intercambiables, lo que indica que se pueden ajustar por cualquiera de los dos lados del molde.

El Extractor de Probetas es un aparato de acero en forma de disco con diámetro de 100 mm (3,95") y 12,7 mm (½") de espesor, utilizado para sacar la probeta compactada del molde, con la ayuda del collar de extensión.

Como equipo de compactación se cuenta con un Martillo de acero conformado de una base plana circular de 98,4 mm (37/8") de diámetro y un pisón de 4,54 kg (10 lb) de peso total, montado en forma que proporcione una altura de caída de 457,2 mm (18").

Así mismo se cuenta con la presencia de un Pedestal de Compactación que consiste de una pieza prismática de madera resistente con una base cuadrada de aproximadamente 200,3 mm de lado y 457,2 mm de altura (8" x 8" x 18") y dotada

⁴² Instituto Nacional de Vías, INVIAS. Método de Diseño Marshall, I.N.V. E- 748.2007. P.1-7

en su parte superior de una platina cuadrada de acero de 304,8 mm de lado x 25,4 mm de espesor (12" x 12" x 1"), fijamente sujeta en la misma. Conviene que la madera corresponda a un roble u otra clase cuya densidad seca sea de 670 a 770 kg/m³ (42 a 48 lb/pie³). El aparato como tal debe descansar sólidamente sobre una base de concreto, la platina de acero quedara en posición horizontal.

El Soporte para molde es un dispositivo con resorte de tensión diseñado para centrar rigurosamente el molde de compactación encima del pedestal. Deberá asegurar el molde completo en su lugar entretanto se esté realizando la compactación.

Para realizar el ensayo se contará con los siguientes elementos:

Mordaza: Consiste en dos piezas de forma cilíndrica, con un radio de curvatura interior de 50.8 mm (2"), con un acabado fino. La parte inferior, que terminará en una base plana, irá provista de dos varillas perpendiculares a la base y que se utilizan de guía al segmento superior.

Se debe contar con un medidor de deformación que corresponderá a un Deformimetro de lectura final fija y separación en centésimas de milímetro, debe estar firme y sujeto al segmento superior cuyo vástago se apoyará, cuando se realiza la prueba, en una palanca graduable ensamblada a la parte inferior.

Prensa: Para fallar las briquetas se utilizará una prensa mecánica cuya rapidez uniforme de desplazamiento sea 50,8 mm por minuto. Esta puede poseer un motor eléctrico incorporado al dispositivo del pistón de carga.

Medidor de la estabilidad: para determinar la resistencia de la briqueta durante el ensayo se evaluará con un anillo dinamométrico ensamblado a la prensa, de 20 ken (2039 kgf) de capacidad, con una sensibilidad de 50N (5 kgf) hasta 5 ken (510 kgf) y 100N (10 kgf) hasta 20 ken (2039 kgf). Las deformaciones del anillo se tomarán con un Deformimetro graduado en 0,001 mm.

Tanque para agua: Con dimensiones de 150 mm (6") de profundidad mínima y registrada termostáticamente para mantener la temperatura a 60 ° C. Este debe poseer un falso fondo agujereado o estar equipado con un estante para conservar las briquetas por mínimo a 50,8 mm (2") por encima del fondo del tanque.

Termómetros blindados: De 10°C a 232°C (50°F a 450°F) para establecer las temperaturas del asfalto, agregados y mezcla, con sensibilidad de 3°C. Para

determinar la temperatura del baño de agua se empleará un termómetro con graduación de 20°C a 70°C y sensibilidad de 0,2°C (68°F a 158°F \pm 0,4°F).

Balanzas: Una de cinco (5) kg de capacidad, sensible a un (1) g para pesar agregados y asfalto; otra de dos (2) kg de capacidad, sensible a 0,1 g para las probetas compactadas.

En la Determinación de las temperaturas de mezcla y compactación se deberán seguir los siguientes criterios:

La temperatura a la cual se debe calentar el cemento asfáltico para las mezclas, es la que es requerida para originar una viscosidad de 170 \pm 20 centiestokes. (1 centiestoke = 1 mm²/S), igualmente la temperatura a la cual deberá calentarse el cemento asfáltico para que alcance una viscosidad de 280 \pm 30 centiestokes, será empleada como la temperatura de compactación.

Para la utilización de asfaltos líquidos, la temperatura de mezclado, que es la que se debe conseguir para que alcance una viscosidad de 170 \pm 20 centiestokes, esta puede fijarse a partir de la curva de viscosidad - temperatura del ejemplar y nivel del asfalto que va a ser empleado, de acuerdo al caso particular.

“Del diagrama de composición del asfalto líquido que se va a emplear, se determinará el porcentaje de solvente que contiene en peso, a partir de su viscosidad a 60°C (140°F). Igualmente, se determinará la viscosidad a 60°C (140°F) del asfalto líquido después de que haya perdido el 50%, del solvente. La temperatura de compactación será la determinada en el diagrama de viscosidad, como la temperatura a la cual deberá calentarse el asfalto líquido para producir una viscosidad de 280 \pm 30 centiestokes, después de una pérdida del 50% del contenido original del solvente, cuando se trate de mezclas para pavimentación”⁴³.

5.4.1. Determinación de la estabilidad y el flujo:

“En esta parte del diseño Marshall, se determina la capacidad que poseen las muestras elaboradas en laboratorio a la aplicación de una carga para medir su resistencia y la deformación presentada a raíz de la presión ejercida sobre ellas.”⁴⁴

⁴³ VASQUES VARELA Luis Ricardo; Universidad Nacional de Colombia; 05 de abril 2015, Pág. 32.

⁴⁴ Método Marshall. Estabilidad y flujo. [en Línea]. Disponible en web < http://www.tecnicascp.com.pe/home/index.php?option=com_jshopping&controller=product&task=view&category_id=11&product_id=212&Itemid=435 >

El equipo para esta parte del diseño, básicamente se trata de un baño de agua maría, el cual debe mantenerse a 60°C de temperatura y una prensa de carga, el cual realizara la función de opresor de las briquetas, las cuales deberán estar colocadas en un molde que garantice que la presión ejercida por la prensa sea uniforme.

Colocar los ejemplares preparados con cemento asfáltico o con alquitrán a la temperatura definida para sumergirse en un baño de agua por 30 o 40 minutos o en el horno durante 2 horas. Manteniendo en el baño o el horno a 60°C. Limpiando suficientemente las barras guías y las zonas interiores del molde de prueba antes de la realización de ésta, y lubricando las barras guías de tal manera que la fracción superior de la mordaza se deslice independientemente. La temperatura del molde de ensayo se debe mantener entre 21,1°C y 37,8°C (70°F a 100°F) utilizando un baño de agua cuando sea preciso. Retirar la probeta del baño de agua, y colóquela centrada en la fracción inferior de la mordaza; se ajusta el segmento superior con el Deformímetro y el conjunto se sitúa centrado en la prensa.

Colocar el medidor de flujo, en su lugar de uso arriba de una de las barras - guía y ajústese la lectura a cero, mientras se conserva firmemente contra la fracción superior de la mordaza. Mantener el vástago del medidor de flujo fijamente en contacto con la fracción superior de la mordaza mientras se aplica la carga durante la prueba.

Aplicar la carga sobre la muestra con una prensa o gato de carga con cabeza de diámetro mínimo de 50,8 mm (2") a una rata de deformación invariable de 50,8 mm (2") por minuto, hasta que sobrevenga la falla. Anotar este valor máximo de carga y, realícese la conversión, si es el caso. El valor total en Newton (libras) que se necesite para provocar la falla de la muestra debe registrarse como el valor de Estabilidad Marshall.

Como se dijo antes, mientras se efectúa el ensayo de estabilidad deberá mantenerse el medidor de flujo firmemente en posición sobre la barra - guía; libérese cuando comience a decrecer la carga y se anotará la lectura. Este será el valor del "flujo" para la muestra, expresado en 0,25 mm (1/100"). Por ejemplo, si la muestra se deformó 3,8 mm (0,15") el valor del flujo será de 15. Este valor expresa la disminución de diámetro que sufre la probeta entre la carga cero y el instante de la rotura. El procedimiento completo, a partir de la sacada de la

probeta del baño de agua, deberá realizarse en un período no mayor de 30 segundos.⁴⁵

6 FASE EXPERIMENTAL

En la primera fase se definió el tipo de cemento asfáltico a utilizar, en este caso se utilizó cemento asfáltico con penetración 60-70, se realizó la caracterización del mismo, identificando sus propiedades físico- químicas, tomando como referencia los ensayos normalizados por el instituto nacional de vías.⁴⁶

La caracterización del agregado pétreo se realizó de acuerdo a las especificaciones generales para el diseño de carreteras dispuestas por el INVIAS (Capítulo 3 pág. 28-31). El material granular fue extraído de la cantera CONCRESCOL.

Posteriormente se determinaron los porcentajes de asfalto 4,5%, 5%, 5,5%,6%, (AC 60-70) y de aditivo 6%, 12,5%, 19,5%,24%,31%,37%,49%,63% para la dosificación de las briquetas.

El estudio pretende elaborar mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-25) modificadas, se toma como referencia la especificación del INVIAS con respecto a la granulometría de los materiales, se realizó tamizado y clasificación del material, con el fin de obtener los porcentajes para cada tamaño y finalmente obtener la dosificación necesaria de cada material para la realización de las briquetas.

Después se efectuó el diseño Marshall estipulado por el INVIAS (capítulo 4 pág. 43-46) determinando las deformaciones flujo, estabilidad, para después procesar los resultados y compararlos.

⁴⁵ VASQUES VARELA Luis Ricardo; *Universidad Nacional de Colombia; 05 de abril 2015, Pág. 33-34.*

⁴⁶ Instituto Nacional de Invias. INVIAS 2013. Capítulo 1, pág. 32

6.1. PROCEDIMIENTO

6.1.1 ENSAYO MARSHALL (INV. E-748-13) CONCRETO ASFALTICO

- Se clasifica el material de acuerdo a la granulometría realizada.

Figura 8. Granulometría del material



Fuente: Autor

- Se Clasifica el material Granular y la Escoria para las briquetas a realizar.

Figura 9. Clasificación material Granular



Fuente: Autor

Figura 10. Clasificación material Granular



Fuente: Autor

- Se Procede a la elaboración de las briquetas; se realiza la mezcla del asfalto con el material granular y el porcentaje de escoria para cada briqueta; se compactan, aplicando 75 golpes por cada briqueta; se remueve la base y los discos de papel del molde y se deja enfriar la muestra par desmoldar sin deformarse.
- Obtenido los porcentajes de asfalto y material granular procedemos a la elaboración de 75 briquetas de 1200 gramos, se realizaron con un asfalto de penetración 60-70, se realizó el diseño de mezcla bajo la especificación establecida por el INVIAS para mezclas densas en caliente tipo 2 (MDC-25) en el método Marshall

Figura 11. Briquetas clasificadas



Fuente: Autor

6.2 PRUEBAS Y ENSAYOS REALIZADOS A LAS BRIQUETAS:

- Determinación del peso específico bulk.
- Ensayo de estabilidad y flujo.

Se colocan la muestra al baño de maría, a una temperatura de 60°C por un tiempo de 40 min; transcurrido este tiempo se sacan las muestras, se secan y se colocan en los cabezales de carga de la prensa Marshall, en donde se aplica carga a una tasa constante de 51 mm por minuto hasta que presente el pico de carga; este resultado se reportará como estabilidad.

Figura 12. Briquetas al baño de maría



Fuente: Autor

➤ Análisis de densidad y vacíos.

Tabla 9. Ensayo Marshall gruesos para probeta de 21-30

	GRUESOS									
Briqueta No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Tipo de Mezcla	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25
% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Altura Briqueta (cm)	6,5	6,4	6,5	6,4	6,5	7	7	6,9	6,9	7
Peso briqueta en aire Seca (g)	1191	1198	1193	1190	1194	1185	1188	1183	1182	1187
Peso briqueta en aire SSS (g)	1198	1200	1195	1192	1196	1189	1191	1187	1186	1191
Peso briqueta en agua (g)	676	677	674	672	674	642	644	641	642	644

% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Altura Briqueta (cm)	7	7	7,1	7	7,1	7	7	6,9	7	7
Paso briqueta en aire Seca (g)	1183	1186	1180	1179	1183	1184	1178	1182	1181	1182
Peso briqueta en aire SSS (g)	1190	1194	1187	1186	1190	1190	1183	1188	1187	1187
Peso briqueta en agua (g)	619	620	619	616	618	614	612	614	613	612
Lectura de carga	88	85	83	85	87	74	76	78	75	76
Flujo (1/100")	105	115	115	110	110	120	110	115	120	115

Fuente: Autor

Tabla 12. Ensayo Marshall para finos probeta de 51-60

	FINOS									
Briqueta No.	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Tipo de Mezcla	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25
% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Altura Briqueta (cm)	6,5	6,6	6,7	6,6	6,6	6,6	6,7	6,6	6,6	6,7
Paso briqueta en aire Seca (g)	1192	1190	1193	1193	1194	1194	1189	1190	1187	1192
Peso briqueta en aire SSS (g)	1195	1193	1196	1196	1194	1199	1193	1194	1192	1197
Peso briqueta en agua (g)	668	666	668	667	667	660	658	659	657	660
Lectura de carga	85	82	84	83	83	87	90	92	89	90
Flujo (1/100")	130	125	135	125	130	135	140	140	135	135

Fuente: Autor

Tabla 13. Ensayo Marshall para finos probeta de 61-70

	FINOS									
Briqueta No.	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Tipo de Mezcla	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25
% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Altura Briqueta (cm)	6,8	6,7	6,8	6,8	6,7	6,9	6,9	6,8	6,9	6,8
Paso briqueta en aire Seca (g)	1188	1182	1190	1189	1190	1179	1177	1180	1185	1182
Peso briqueta en aire SSS (g)	1193	1187	1194	1194	1195	1185	1184	1186	1192	1189
Peso briqueta en agua (g)	650	645	651	651	650	635	633	635	637	636
Lectura de carga	86	84	88	85	85	73	72	70	71	73
Flujo (1/100")	145	140	145	145	140	150	155	160	155	155

Fuente: Autor

Tabla 14. Ensayo Marshall para finos probeta d 70-75

	FINOS				
Briqueta No.	71	72	73	74	75
Tipo de Mezcla	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25	MDC-25

% Asfalto	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%	5,5%
Altura Briqueta (cm)	7	6,8	6,8	7	7
Paso briqueta en aire Seca (g)	1175	1172	1179	1176	1180
Peso briqueta en aire SSS (g)	1185	1180	1187	1185	1189
Peso briqueta en agua (g)	630	629	632	631	633
Lectura de carga	60	59	61	63	59
Flujo (1/100")	170	175	170	170	170

Fuente: Autor

7 ANALISIS DE RESULTADOS

La selección del porcentaje óptimo de asfalto se realizó bajo los parametros establecidos por el INVIAS (2013) para las mezclas densas en caliente tipo 2 MDC-25 por el metodo del instituto del asfalto, en cuanto a estabilidad, flujo y relacion estabilidad flujo . Se estableció que el contenido de asfalto que deberian contener las muestras elaboradas con AC 60-70 sería del 5,5%. Con este valor se cumplen los parametros de estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos para un nivel de transito pesado

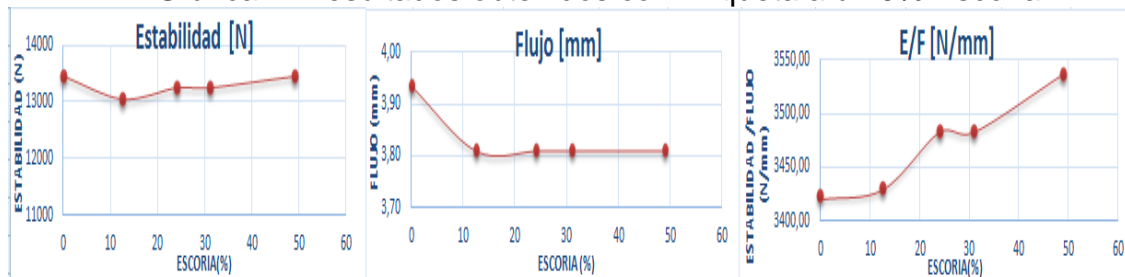
Tabla 10. Estabilidad y flujo para Gruesos 0%.

0%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch./100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
67	13476	155	3,94	3422,82
65	13073	150	3,81	3431,34
66	13275	150	3,81	3484,13

66	13275	150	3,81	3484,13
67	13476	150	3,81	3536,92
66,20	13315	151,00	3,84	3471,87

Fuente: Autor

Gráfica 1. Resultados obtenidos con Briqueta a un 0% Escoria



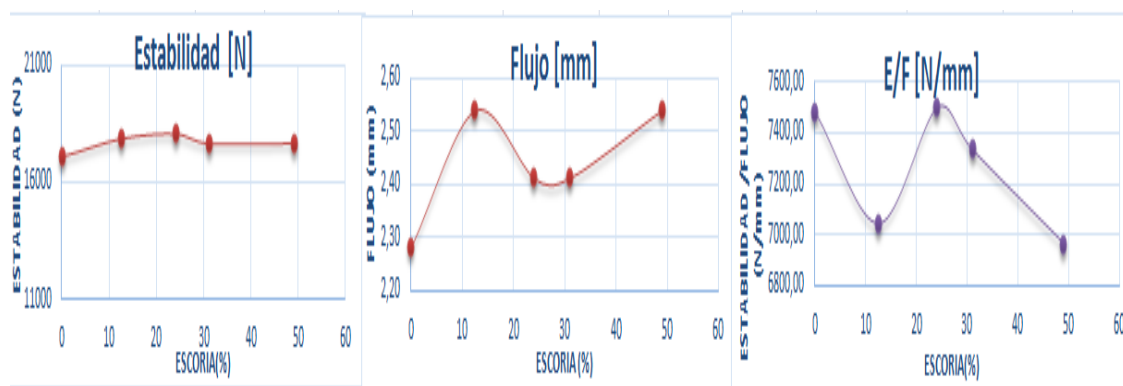
Fuente: Autor

Tabla 11. Estabilidad y flujo para Gruesos 12,5%

12.5%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
85	17096	90	2,29	7478,55
89	17900	100	2,54	7047,44
90	18102	95	2,41	7501,71
88	17699	95	2,41	7335,00
88	17699	100	2,54	6968,25
88,00	17699	96,00	2,44	7266,19

Fuente: Autor

Gráfica 2. Resultados obtenidos con Briqueta a un 12.5% Escoria



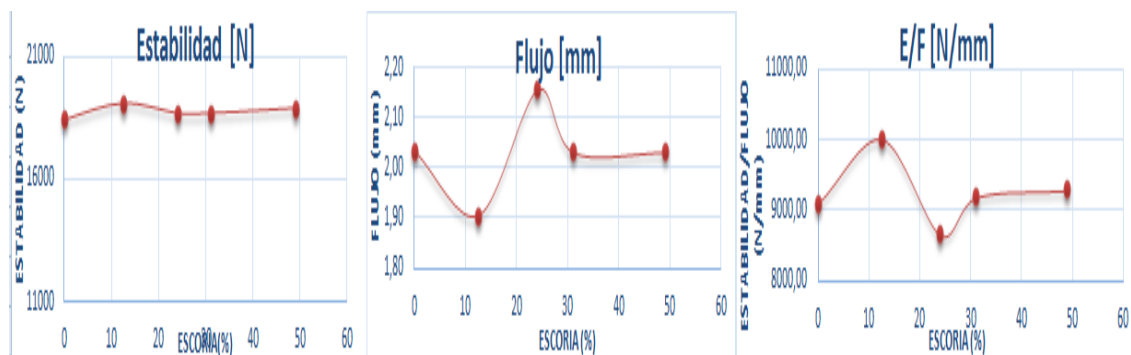
Fuente: Autor

Tabla 12. Estabilidad y flujo para Gruesos 24%

31%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
92	18504	80	2,03	9106,24
95	19107	75	1,91	10030,06
93	18705	85	2,16	8663,74
93	18705	80	2,03	9205,22
94	18906	80	2,03	9304,20
93,40	18785	80,00	2,03	9261,89

Fuente: Autor

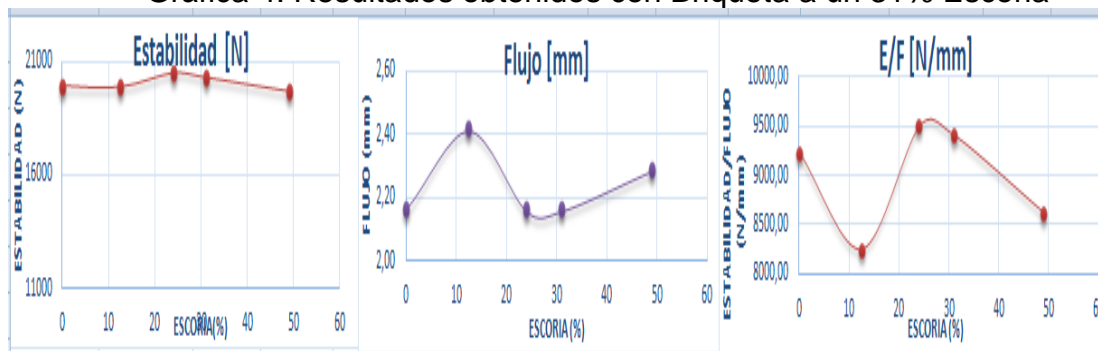
Gráfica 3. Resultados obtenidos con Briqueta a un 24% Escoria



Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
99	19912	85	2,16	9222,69
99	19912	95	2,41	8251,88
102	20515	85	2,16	9502,16
101	20314	85	2,16	9409,01
98	19711	90	2,29	8622,33
99,80	20073	88,00	2,24	9001,61

Fuente: Autor

Gráfica 4. Resultados obtenidos con Briqueta a un 31% Escoria



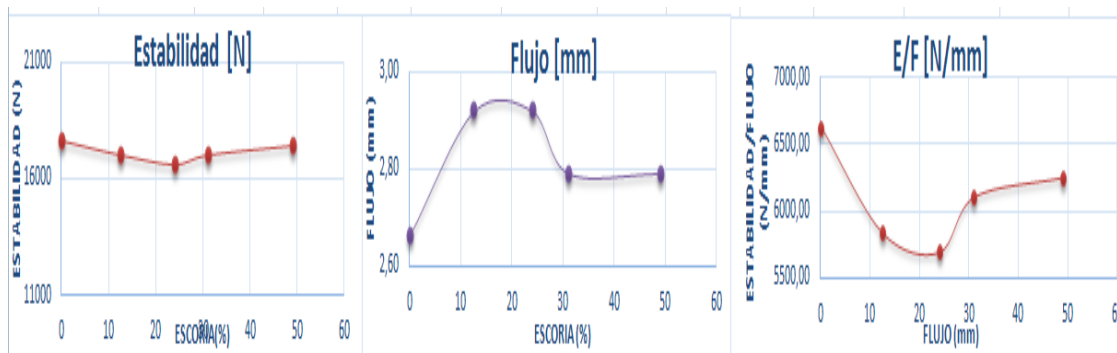
Fuente: Autor

Tabla 14. Estabilidad y flujo para Gruesos 49%

49%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
88	17699	105	2,67	6636,43
85	17096	115	2,92	5852,78
83	16694	115	2,92	5715,07
85	17096	110	2,79	6118,82
87	17498	110	2,79	6262,79
85,60	17217	111,00	2,82	6117,18

Fuente: Autor

Gráfica 5. Resultados obtenidos con Briqueta a un 49% Escoria



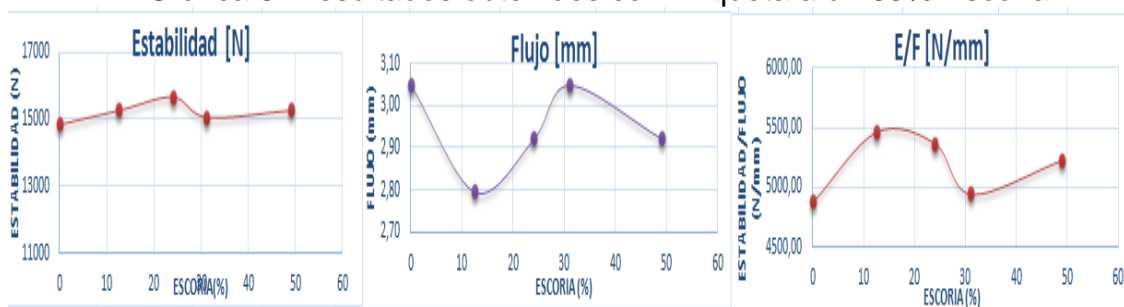
Fuente: Autor

Tabla 15. Estabilidad y flujo para Gruesos 63%

63%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
74	14884	120	3,05	4883,06
76	15286	110	2,79	5470,94
78	15688	115	2,92	5370,79
75	15085	120	3,05	4949,04
76	15286	115	2,92	5233,08
75,80	15246	116,00	2,95	5181,38

Fuente: Autor

Gráfica 6. Resultados obtenidos con Briqueta a un 63% Escoria



Fuente: Autor

Tabla 16. Resumen Estabilidad y flujo para Gruesos.

RESUMEN			
Escoria (%)	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
0	12955	3,84	3378
12,5	15646	2,44	6423
24	17433	2,03	8595
31	17443	2,24	7822
49	14651	2,82	5206
63	11892	2,95	4041

Fuente: Autor

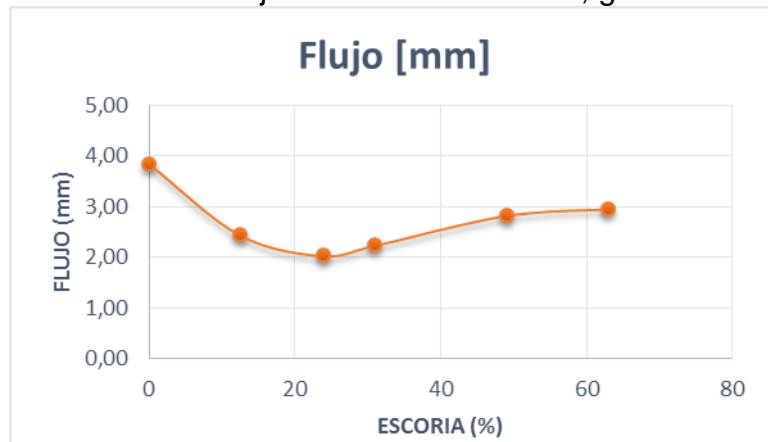
En esta tabla se procede a realizar un análisis de resultado, con la sumatoria de todos los datos obtenidos con los diferentes porcentajes de escoria; en los cuales se puede observar el efectivo funcionamiento de este agregado para la mezcla asfáltica.

Gráfico 7: Estabilidad contra % de Escoria, gruesos.



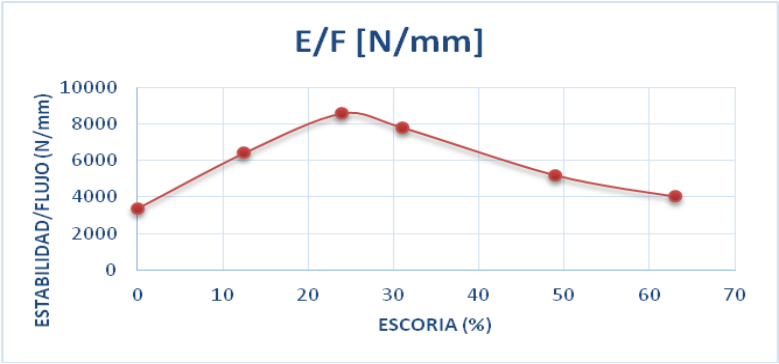
Fuente: Autor

Gráfico 8: Flujo contra % de Escoria, gruesos.



Fuente: Autor

Gráfico 9: Estabilidad/Flujo contra % de Escoria, gruesos.



Fuente: Autor

Tabla 12. Relación de vacíos; porcentaje de escoria contra vacíos, gruesos.

RESUMEN	
Escoria (%)	Vacíos
0	3,5
12,5	6,2
24	6,2
31	7,8
49	10,5
63	11,0

Fuente: Autor

Gráfico 10: % Escoria contra Vacíos, gruesos.



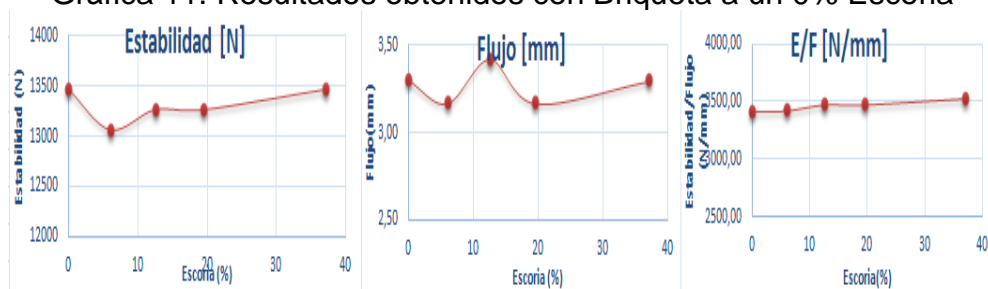
Fuente: Autor

Tabla 13. Estabilidad y Flujo para finos. 0% Escoria

0%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
67	13476	155	3,94	3422,82
65	13073	150	3,81	3431,34
66	13275	150	3,81	3484,13
66	13275	150	3,81	3484,13
67	13476	150	3,81	3536,92
66,20	13315	151,00	3,84	3471,87

Fuente: Autor

Gráfica 11. Resultados obtenidos con Briqueta a un 0% Escoria



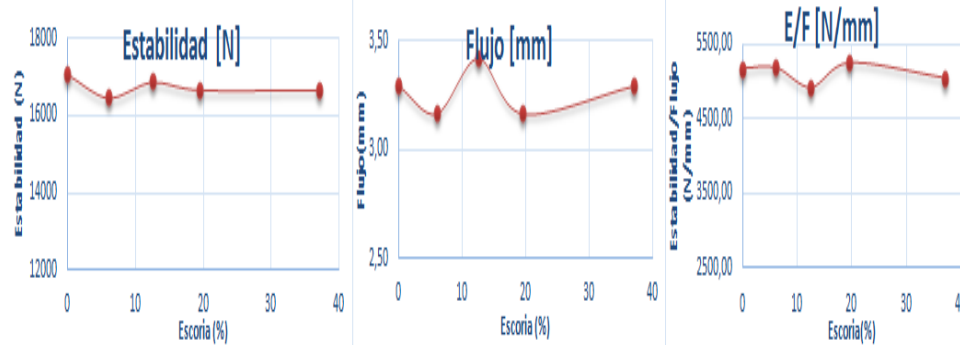
Fuente: Autor

Tabla 14. Estabilidad y Flujo para finos. 6% Escoria

6%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
85	17096	130	3,30	5177,46
82	16493	125	3,18	5194,52
84	16895	135	3,43	4927,05
83	16694	125	3,18	5257,86
83	16694	130	3,30	5055,64
83,40	16774	129,00	3,28	5122,51

Fuente: Autor

Gráfica 12. Resultados obtenidos con Briqueta a un 6% Escoria



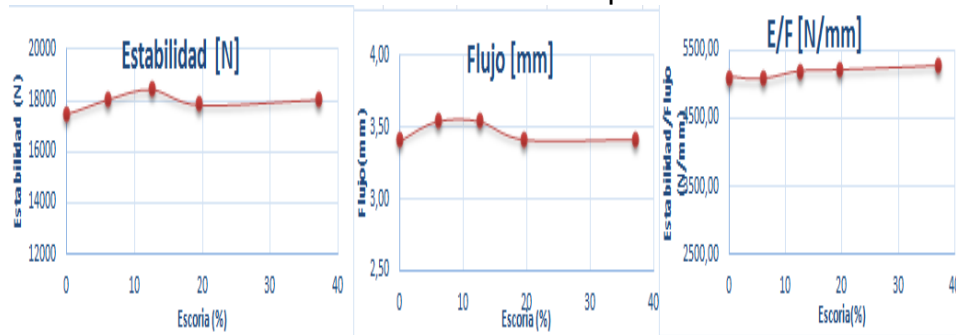
Fuente: Autor

Tabla 15. Estabilidad y Flujo para finos. 12.5% Escoria

12.5%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
87	17498	135	3,43	5103,01
90	18102	140	3,56	5090,44
92	18504	140	3,56	5203,57
89	17900	135	3,43	5220,32
90	18102	135	3,43	5278,98
89,60	18021	137,00	3,48	5179,27

Fuente: Autor

Gráfica 13. Resultados obtenidos con Briqueta a un 12.5% Escoria



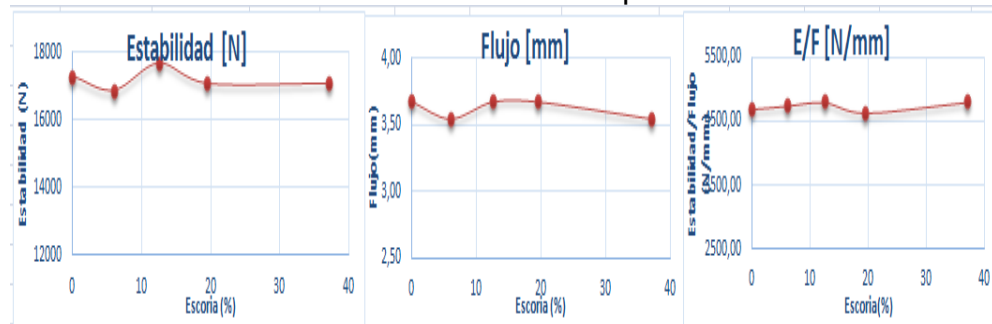
Fuente: Autor

Tabla 16. Estabilidad y Flujo para finos. 19.5% Escoria

19.5%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
86	17297	145	3,68	4696,47
84	16895	140	3,56	4751,08
88	17699	145	3,68	4805,69
85	17096	145	3,68	4641,86
85	17096	140	3,56	4807,64
85,60	17217	143,00	3,63	4740,55

Fuente: Autor

Gráfica 14. Resultados obtenidos con Briqueta a un 19.5% Escoria



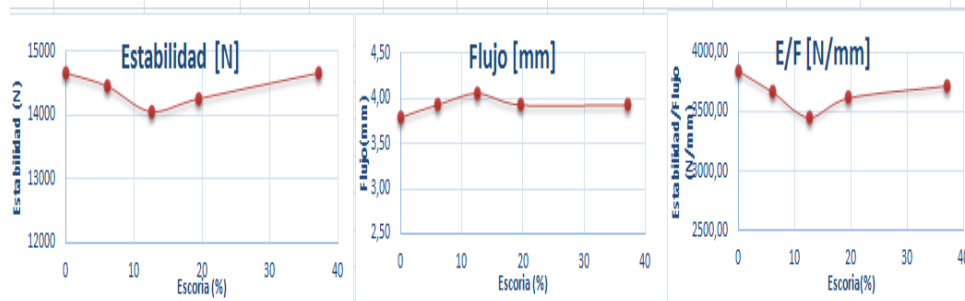
Fuente: Autor

Tabla 17. Estabilidad y Flujo para finos. 37% Escoria

37%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
73	14682	150	3,81	3853,66
72	14481	155	3,94	3678,26
70	14079	160	4,06	3464,33
71	14280	155	3,94	3627,17
73	14682	155	3,94	3729,34
71,80	14441	155,00	3,94	3670,55

Fuente: Autor

Gráfica 15. Resultados obtenidos con Briqueta a un 37% Escoria



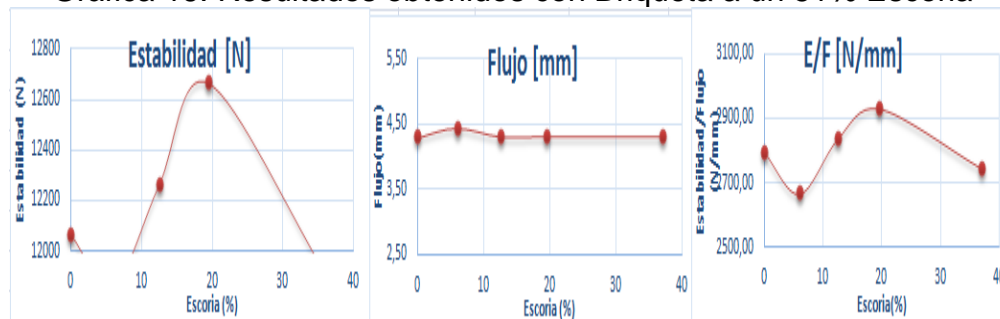
Fuente: Autor

Tabla 18. Estabilidad y Flujo para finos. 51% Escoria

51%				
Estabilidad	Estabilidad [N]	Flujo [inch/100]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
60	12068	170	4,32	2794,75
59	11867	175	4,45	2669,66
61	12269	170	4,32	2841,33
63	12671	170	4,32	2934,49
59	11867	170	4,32	2748,17
60,40	12148	171,00	4,34	2797,68

Fuente: Autor

Gráfica 16. Resultados obtenidos con Briqueta a un 51% Escoria



Fuente: Autor

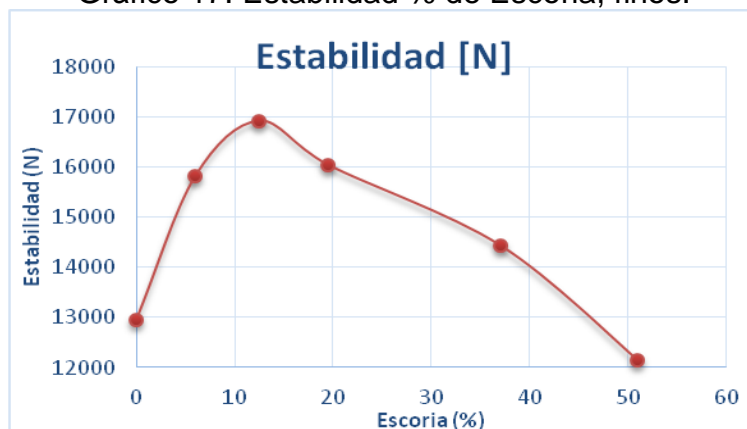
Tabla 19. Resumen Estabilidad y flujo para finos.

RESUMEN			
Escoria (%)	Estabilidad [N]	Flujo [mm]	E/F [N/mm]
0	12955	3,84	3378
6	15818	3,28	4831
12,5	16922	3,48	4863
19,5	16046	3,63	4418
37	14441	3,94	3671
51	12148	4,34	2798

Fuente: Autor

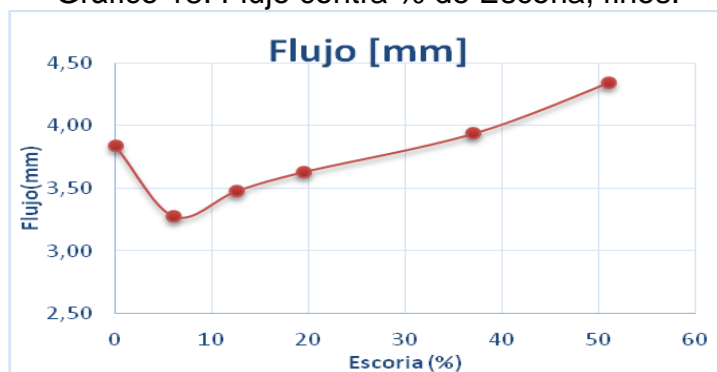
En esta tabla se procede a realizar un análisis de resultado, con la sumatoria de todos los datos obtenidos con los diferentes porcentajes de escoria; en los cuales se puede observar el efectivo funcionamiento de este agregado para la mezcla asfáltica.

Gráfico 17: Estabilidad % de Escoria, finos.



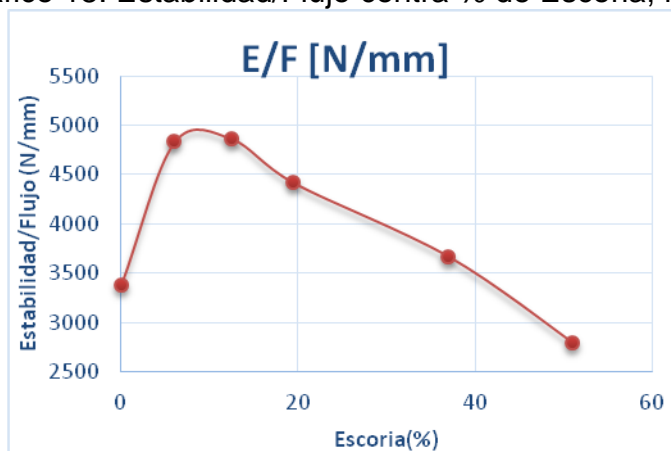
Fuente: Autor

Gráfico 18: Flujo contra % de Escoria, finos.



Fuente: Autor

Gráfico 18: Estabilidad/Flujo contra % de Escoria, finos.



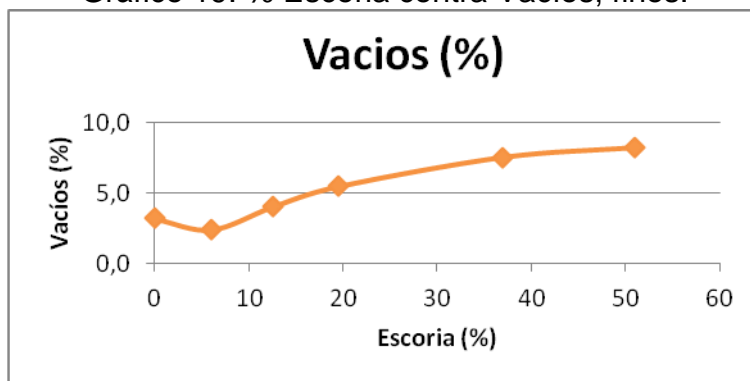
Fuente: Autor

Tabla 20. Relación de vacíos; porcentaje de escoria contra vacíos, finos.

RESUMEN	
Escoria (%)	Vacíos
0	3,2
6	2,4
12,5	4,0
19,5	5,5
37	7,5
51	8,2

Fuente: Autor

Gráfico 19: % Escoria contra Vacíos, finos.



Fuente: Autor

8 CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos en el proyecto, indican que el tipo de aditivo mejora las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales, en cuanto a estabilidad de la muestra compactada, flujo y rigidez Marshall.
- Cuando la escoria se combina con agregados tradicionales, el contenido de asfalto disminuye conforme aumenta el porcentaje de escoria en la mezcla.
- Las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad Marshall que las mezclas con agregados tradicionales.
- Al realizar modificación en la mezcla asfáltica con escoria se presenta alta resistencia, lo cual mejoraría la deformación por ahuecamiento.
- Debido a que las mezclas con escoria presentan valores más altos de estabilidad, las mismas son más resistentes a la deformación causada por el tráfico.
- El método de diseño Marshall es adecuado para diseñar mezclas con escoria, no presentó ningún problema en su aplicación a dicho material.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir la investigación del MDC-25; con agentes modificadores como la escoria de Acero.
- Dar seguimiento a esta investigación, haciendo un tramo de prueba, para evaluar el comportamiento de la escoria en pavimento soportando cargas de tráfico y los efectos del clima.
- Realizar de 3 a 5 Briquetas para cada porcentaje de asfalto modificado para obtener un error mínimo.

10 BIBLIOGRAFIA

- AFANASJEVA, Natalia y ALVAREZ, Cifuentes Mario, Estudio del envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos. Bucaramanga: Editorial y publicaciones UIS universidad Industrial de Santander, 2004.403p
- AMERI M., HESAMI, S. & GOLI H. (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt containing electric arc furnace (EAF) steel slag. Construction and Building Materials 49, 611-617. ELSEVIER.
- ARENAS LOZANO, Hugo León. Tecnología del cemento asfáltico. Popayán: Litocenco Ltda., 5ª edición., 2006. 253p.
- ASOPAC, Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia. Cartilla del pavimento asfáltico. Bogotá: 1994. 52p.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras,2013.
- LARSON D, Thomas. Concretos de Cementos Portland y Asfálticos. México: Compañía editorial continental S.A. 2ª edición, 1977. 189p.
- MONTEJO, Alfonso. Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2001. 733p.
- Normas de ensayo de materiales para carreteras, Diseño Marshall, INV. E-748.2013.

- ORTIZA REYES, Óscar Javier. CAMACHO TAUTA, Javier Fernando y LIZCANO, B. Freddy. Influencia de la Temperatura y Nivel de Compactación en las Propiedades Dinámicas de una mezcla Asfáltica. Medellín: Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2006.130p.
- RONDON QUINTANA, Hugo Alexander. Serie de guías: Fundamentos 1.Bogota D.C. Universidad Católica de Colombia. Edición 1, 2009. 126P.
- SABOGAL SÁNCHEZ, Fernando. Introducción al uso de asfaltos modificados con polímeros en la construcción y mantenimiento de carreteras. Bogotá. 1996.